

**SCHIRLENE CHEGATTI**

**APLICAÇÃO DE RESÍDUOS DE FUNDIÇÃO EM MASSA ASFÁLTICA,  
CERÂMICA VERMELHA E FRITAS CERÂMICAS**

**FLORIANÓPOLIS  
2004**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**APLICAÇÃO DE RESÍDUOS DE FUNDIÇÃO EM MASSA ASFÁLTICA,  
CERÂMICA VERMELHA E FRITAS CERÂMICAS**

Dissertação submetida à  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como parte dos requisitos para a  
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental.

**SCHIRLENE CHEGATTI**

Florianópolis, Agosto de 2004.

# **APLICAÇÃO DE RESÍDUOS DE FUNDIÇÃO EM MASSA ASFÁLTICA, CERÂMICA VERMELHA E FRITAS CERÂMICAS**

Schirlene Chegatti

‘Esta Dissertação foi julgada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Ambiental, Área de Concentração em Tecnologias de Saneamento Ambiental, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina’.

Avaliado por:

---

**Sebastião Roberto Soares, Dr.**  
Orientador

---

**Armando Borges de Castilhos Jr., Dr.**  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Ambiental  
Membro

---

**Nelson H. A. Camargo, Dr.**  
Membro

---

**Therezinha Novaes de Oliveira, Dra.**  
Membro

## **AGRADECIMENTOS**

Aquele que pratica o agradecimento cresce como cidadão e tem em mãos uma infinidade de oportunidades.

- Por toda persistência conferida a mim, agradeço a Deus;
- Pelo apoio, compreensão e paciência, agradeço aos meus pais. Razão de toda minha força interior;
- Por todo amor recebido, ao Edu;
- Pela amizade, aos meus amigos e colegas de trabalho;
- Por acreditar na minha competência, à Schulz, em especial aos Srs. Edmilson Holtz e Mário Krüger, sempre apoiando e confiando no sucesso desta jornada;
- Pela excelência dos serviços prestados, a toda equipe do CTMat – Centro de Tecnologia de Materiais, da Acquaplant e da Engepasa Infraestrutura;
- Por acreditar que as pesquisas, o ensino e a educação são a base para o desenvolvimento sustentável, meus agradecimentos a Universidade Federal de Santa Catarina, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, e em especial ao Professor Doutor Sebastião Roberto Soares;
- Para todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a execução deste trabalho, minha gratidão.



*“No final tudo dá certo. E se ainda não deu certo, é porque ainda não chegou o final...”*

(Anônimo)

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE TABELAS E QUADROS .....</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE EQUAÇÕES .....</b>	<b>XI</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>XIII</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XIV</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	3
<b>2. CICLO DE VIDA DA AREIA DE FUNDIÇÃO .....</b>	<b>4</b>
2.1 PROCESSO DE FUNDIÇÃO .....	4
2.2 RESÍDUOS GERADOS NO PROCESSO DE FUNDIÇÃO .....	8
2.3 CARACTERIZAÇÃO DA AREIA DE FUNDIÇÃO .....	10
2.4 IMPACTOS AMBIENTAIS DA AREIA DE FUNDIÇÃO .....	15
<b>3. VALORIZAÇÃO DE AREIAS DE FUNDIÇÃO .....</b>	<b>17</b>
3.1 REGENERAÇÃO E RECUPERAÇÃO DE AREIA .....	17
3.2 UTILIZAÇÃO PARA ATERROS SANITÁRIOS E INDUSTRIAIS .....	19
3.3 FABRICAÇÃO DE ASFALTO .....	21
3.4 APLICAÇÃO EM MATERIAIS CERÂMICOS .....	28
3.4.1 CERÂMICA VERMELHA .....	28
3.4.2 FRITAS CERÂMICAS .....	36
3.5 OUTRAS APLICAÇÕES .....	38

3.5.1 CONCLUSÕES.....	42
<b>4. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>44</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE RESÍDUOS DE FUNDIÇÃO.....	44
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS.....	44
4.2.1 AMOSTRAGEM PARA CARACTERIZAÇÃO .....	45
4.2.2 ANÁLISE QUÍMICA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X.....	47
4.2.3 ANÁLISE TÉRMICA SIMULTÂNEA (DIFERENCIAL E TERMO-GRAVIMÉTRICA) .....	47
4.2.4 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA.....	48
4.2.5 MASSA BRUTA.....	48
4.3 TESTE DE APLICAÇÃO DOS RESÍDUOS DE AREIA DE FUNDIÇÃO EM MASSA ASFÁLTICA.....	50
4.3.1 DETERMINAÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS DA MISTURA.....	52
4.3.2 DETERMINAÇÃO DA MASSA DOS AGREGADOS PARA A FORMAÇÃO DA MISTURA .....	53
4.3.3 FORMAÇÃO DE AMOSTRAS DAS FRAÇÕES GRAÚDA, MIÚDA E PULVERULENTO DA MISTURA PARA A DETERMINAÇÃO DAS DENSIDADES REAIS .....	54
4.3.4 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DO AGREGADO GRAÚDO .....	55
4.3.5 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DO AGREGADO MIÚDO .....	56
4.3.6 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DO MATERIAL FINAMENTE PULVERIZADO.....	57
4.3.7 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE MÉDIA DA MISTURA.....	58
4.3.8 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE TEÓRICA DA MISTURA .....	59
4.3.9 EXECUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	59
4.3.10 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE INDIVIDUAL PARA OS CORPOS DE PROVA.....	61
4.3.11 DETERMINAÇÃO DA ESTABILIDADE E FLUÊNCIA DA MISTURA ASFÁLTICA .....	61
4.3.12 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE EXPRESSA COMO PERCENTUAL DA DENSIDADE DA MISTURA .....	63
4.3.13 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE VAZIOS DA MISTURA .....	63
4.3.14 DETERMINAÇÃO DOS VAZIOS DA MISTURA ASFÁLTICA EM FUNÇÃO DO AGREGADO MINERAL ....	64
4.3.15 DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE VAZIOS E BETUME .....	64
4.3.16 DETERMINAÇÃO DA LIXIVIAÇÃO DAS MASSAS ASFÁLTICAS .....	65
4.4 TESTE DE APLICAÇÃO DE RESÍDUOS DE AREIA DE FUNDIÇÃO EM CERÂMICA VERMELHA.....	67
4.4.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	68
4.4.2 DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA (MÉTODO DE FERVURA) .....	68
4.4.3 DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE RUPTURA À FLEXÃO .....	69

4.4.4 DETERMINAÇÃO DA RETRAÇÃO TÉRMICA LINEAR (RL/DILATOMETRIA).....	69
4.4.5 DETERMINAÇÃO DA LIXIVIAÇÃO DA CERÂMICA.....	70
4.5 <i>TESTE DE APLICAÇÃO DE RESÍDUOS DE AREIA DE FUNDIÇÃO EM FRITAS CERÂMICAS</i> .....	71
4.5.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	72
4.5.2 ANÁLISE QUÍMICA POR ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X .....	72
4.5.3 ANÁLISE TÉRMICA SIMULTÂNEA (ATD/ATG) .....	73
4.5.4 ANÁLISE DILATOMÉTRICA .....	73
4.5.5 ANÁLISE VISUAL .....	73
4.5.6 DETERMINAÇÃO DA LIXIVIAÇÃO DAS FRITAS CERÂMICAS.....	73
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>74</b>
5.1 <i>CARACTERIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE RESÍDUOS DE FUNDIÇÃO</i> .....	74
5.2 <i>CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE AREIA DE FUNDIÇÃO</i> .....	76
5.2.1 ANÁLISE QUÍMICA OBTIDA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X.....	76
5.2.2 ANÁLISE TÉRMICA SIMULTÂNEA.....	77
5.2.3 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA.....	78
5.2.4 ANÁLISE DE MASSA BRUTA .....	80
5.3 <i>UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE AREIA DE FUNDIÇÃO EM MASSA ASFÁLTICA</i> .....	81
5.3.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA .....	81
5.3.2 ANÁLISE DAS DENSIDADES DOS AGREGADOS MINERAIS E DENSIDADE TEÓRICA DA MISTURA .....	83
5.3.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS DE ESTABILIDADE, FLUÊNCIA , VAZIOS DA MISTURA, VAZIOS DO AGREGADO E RELAÇÃO BETUME VAZIOS .....	84
5.3.4 LIXIVIAÇÃO .....	85
5.4 <i>UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE AREIA DE FUNDIÇÃO EM CERÂMICA VERMELHA</i> .....	89
5.4.1 RESULTADOS DAS CARACTERÍSTICAS DE QUALIDADE DOS CORPOS DE PROVA.....	89
5.4.2 LIXIVIAÇÃO .....	91
5.5 <i>UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE AREIA DE FUNDIÇÃO EM FRITAS CERÂMICAS</i> .....	93
5.5.1 RESULTADOS DAS CARACTERÍSTICAS DE QUALIDADE DOS CORPOS DE PROVA.....	93
5.5.2 LIXIVIAÇÃO .....	102

<b>6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>105</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>108</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>116</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Fluxograma do Processo de Fundição.....	7
Figura 2.2	Fluxograma do Processo de Fundição com Entradas e Saídas. ....	9
Figura 3.1	Fluxograma dos processos de Fabricação de Blocos e Telhas.....	31
Figura 3.2	Panorama da Indústria de Cerâmica Vermelha.....	33
Figura 3.3	Representação Esquemática da Reutilização de um Resíduo Industrial...35	
Figura 4.1	Fluxograma da Caracterização de Resíduos de Fundição. ....	45
Figura 4.2	Fluxograma do Teste de Aplicação de Resíduos de Fundição em Massa Asfáltica .....	51
Figura 4.3	Fluxograma do Teste de Aplicação de Resíduos de Fundição em Cerâmica Vermelha. ....	67
Figura 4.4	Fluxograma do Teste de Aplicação de Resíduos de Fundição em Fritas Cerâmicas.....	71
Figura 5.1	Fluxograma da Geração de Resíduos de Fundição. (Schulz S.A.).....	75
Figura 5.2	Absorção d'Água das Amostras Estudadas das Curvas de Sinterização .89	
Figura 5.3	Retração Linear das Amostras Estudadas das Curvas de Sinterização ....	90
Figura 5.4	Resistência Mecânica das Amostras Estudadas das Curvas de Sinterização .....	91
Figura 5.5	Análise Térmica Simultânea da Frita Padrão .....	95
Figura 5.6	Análise Térmica do Resíduo A – Areia do Sistema com 30% em Massa ...	96
Figura 5.7	Análise Térmica do Resíduo A – Areia do Sistema com 60% em Massa ...	97
Figura 5.8	Análise Térmica do Resíduo A – Areia do Sistema com 100% em Massa .97	
Figura 5.9	Análise Térmica do Resíduo B – Areia do Sistema com 30% em Massa ...	98
Figura 5.10	Análise Térmica do Resíduo B – Areia do Sistema com 60% em Massa ...	98
Figura 5.11	Análise Térmica do Resíduo B – Areia do Sistema com 100% em Massa	99
Figura 5.12	Análise Térmica do Resíduo C – Areia do Sistema com 30% em Massa .100	
Figura 5.13	Análise Térmica do Resíduo C – Areia do Sistema com 60% em Massa .100	
Figura 5.14	Análise Térmica do Resíduo C – Areia do Sistema com 100% em Massa	101

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 2.1	Composição típica e propriedades da Areia Verde.....	12
Tabela 2.2	Propriedades do Resíduo de Areia de Fundição. ....	12
Tabela 2.3	Composição química da Areia de Fundição por Fluorescência de Raios-X. ....	13
Quadro 4.1	Espécies e Métodos de Análise.....	49
Tabela 4.1	Limites Granulométricos e Faixa de Trabalho. ....	53
Tabela 4.2	Quantidades de Peças Geradas para Ensaios de Qualidade e Ambiental. ....	54
Tabela 4.3	Identificação das Frações dos Agregados.....	58
Tabela 4.4	Identificação das Densidades dos Agregados.....	58
Quadro 4.2	Correção da Estabilidade, em função da Espessura ou dos Volumes. ....	62
Quadro 4.3	Espécies e Métodos de Análise.....	66
Tabela 4.5	Composição das Amostras Analisadas. ....	68
Tabela 4.6	Amostras Analisadas.....	72
Tabela 5.1	Geração de Resíduos de Fundição (Schulz S.A.). ....	74
Tabela 5.2	Composição Química obtida por FRX. ....	77
Tabela 5.3	Distribuição Granulométrica. ....	79
Tabela 5.4	Resultados da Massa Bruta de Resíduos de Areia de Fundição.....	80
Tabela 5.5	Resultados das Análises Granulométricas da Areia (% retido na peneira) .	81
Tabela 5.6	Percentuais dos Agregados Conforme Valores Bases de Misturas Asfálticas .....	82
Tabela 5.7	Composição dos Corpos de Prova em Massa Asfáltica .....	83
Tabela 5.8	Densidades dos Agregados Minerais e Densidade Teórica da Mistura asfáltica.....	84
Tabela 5.9	Especificações do Concreto Betuminoso Usinado à Quente CBUQ – faixa C.....	84
Tabela 5.10	Lixiviação dos Corpos de Prova Contendo Areia A ( Sistema) .....	86
Tabela 5.11	Lixiviação dos Corpos de Prova Contendo Areia B (Quebra de Canais) ....	86
Tabela 5.12	Lixiviação dos corpos de prova contendo Areia C (Exaustão).....	87
Tabela 5.13	Lixiviação dos Corpos de Prova em Cerâmica Vermelha.....	92
Tabela 5.14	Composição Química Obtida por FRX das Amostras Estudadas (% em massa).....	94
Tabela 5.15	Coeficiente de Expansão Térmica das Amostras. ....	101
Tabela 5.16	Resultados da Lixiviação dos Corpos de Prova em Fritas Cerâmicas.....	102

## LISTA DE EQUAÇÕES

(Equação 4.1 Cálculo do Percentual de Massa Retido ) .....	48
(Equação 4.2 Cálculo da Massa Bruta).....	49
(Equação 4.3 Cálculo do Percentual de Massa Retido ) .....	52
(Equação 4.4 Cálculo do Percentual de Massa Passado).....	52
(Equação 4.5 Cálculo do Percentual de Massa Passado).....	52
(Equação 4.6 Percentual da Fração em Relação à Mistura) .....	54
(Equação 4.7 Cálculo da Fração Individual).....	55
(Equação 4.8 Cálculo da Massa das Amostras).....	55
(Equação 4.9 Cálculo da Densidade Aparente) .....	55
(Equação 4.10 Cálculo da Densidade Real).....	56
(Equação 4.11 Cálculo da Absorção).....	56
(Equação 4.12 Cálculo da Massa Específica Real).....	56
(Equação 4.13 Cálculo da Massa Específica do Material Pulverulento) .....	57
(Equação 4.14 Cálculo da Densidade Real da Mistura) .....	58
(Equação 4.15 Cálculo da Densidade Aparente da Mistura) .....	58
(Equação 4.16 Cálculo da Densidade Média da Mistura de Agregados).....	58
(Equação 4.17 Cálculo da Densidade Teórica da Mistura Asfáltica) .....	59
(Equação 4.18 Cálculo da Massa de Betume) .....	60
(Equação 4.19 Cálculo da Densidade Aparente) .....	61
(Equação 4.20 Cálculo da Estabilidade) .....	62
(Equação 4.21 Cálculo da Fluência) .....	63
(Equação 4.22 Cálculo da Densidade Expressa Como Percentual).....	63
(Equação 4.23 Cálculo do Teor de Vazios da Mistura Asfáltica) .....	63
(Equação 4.24 Cálculo dos Vazios da Mistura Asfáltica em Função dos Agregados Minerais).....	64
(Equação 4.25 Cálculo da Relação entre Vazios e Betume) .....	64
(Equação 4.26 Cálculo da Absorção de Água).....	69



(Equação 4.27 Cálculo do Módulo de Ruptura).....	69
(Equação 4.28 Cálculos da Retração Linear).....	70

## RESUMO

A preocupação com o estado do meio ambiente é crescente, principalmente em função da disponibilidade de recursos tais como energia, matérias primas, áreas para aterros e da preservação do meio natural. Diante deste panorama as atividades industriais preocupam-se em aperfeiçoar seus processos de modo a consumir menos materiais na produção, gerar menor quantidade de resíduos, e aperfeiçoar o aproveitamento de seus subprodutos através da valorização de seus resíduos. Além disso, a valorização de resíduos pode auxiliar as empresas a reduzirem seus custos tornando-se cada vez mais competitivas.

Atualmente as indústrias de fundição ou metalúrgicas ainda tem uma expressiva contribuição quanto aos impactos gerados pelas suas atividades, seja pelo consumo de uma considerável gama de matérias primas ou energia, seja pelos impactos ambientais associados principalmente da geração de seus resíduos. Contudo, as fundições têm buscado reverter este panorama, através da redução na geração de resíduos pela reciclagem ou pela sua reutilização, tornando-se conseqüentemente mais competitivas.

Neste contexto, este estudo teve como objetivo principal verificar a aplicabilidade de resíduos de fundição em massas asfálticas do tipo CBUQ – classe C, cerâmica vermelha e fritas cerâmicas. Os resíduos testados foram areias de fundição geradas nos processos de moldagem, quebra de canais e exaustão. As amostras foram caracterizadas através de ensaios de Massa Bruta, FRX, ATD/ATG e Distribuição Granulométrica. Os corpos de prova foram elaborados utilizando-se diferentes percentuais de areia e posteriormente avaliados quanto a propriedades de qualidade (testes específicos de cada aplicação) e ambientais (através de ensaios de lixiviação, conforme NBR 10.004/10.005).

Os resultados mostraram que é possível utilizar cerca de 10% em massa de resíduos tanto em massas asfálticas quanto em cerâmica vermelha. Quanto à aplicação de resíduos na formulação de fritas cerâmicas, sua utilização está voltada para o uso como aditivo na formulação de fritas cerâmicas opacas em concentrações entre 30 e 60% em massa, dependendo das exigências estéticas do material a ser produzido.

Palavras Chave: areia de fundição, cerâmica vermelha, fritas cerâmicas, resíduos industriais.

## ABSTRACT

The concern with the environment is increasing, mainly in function of the availability of resources such as energy, raw materials, areas for landfills and environmental protection. Ahead of this panorama the industrial activities are worried in improving its processes in order to reduce its material consume in the production, to generate minor amount of wastes, and to improve the utilization of its by-products through the valuation of its wastes. Besides, the valuation of wastes can help the companies to reduce its costs and to improve its competition.

Currently, the industries of casting still have a significant contribution to the impacts generated for its activities, either by the consumption of a considerable gamma of raw materials or energy, either by the environmental impacts associates mainly by generation of its wastes.

In this context, this work made with samples of casting residues had as objective to verify its applicability in asphalt and ceramic materials (ceramic frits and structural ceramic). It was tested spent foundry sands from exhaust system, gateing removal and molding system. The samples were characterized by x-ray fluorescence, DTA/TG, grand size distribution and mass analysis. The asphalt and ceramic materials samples were made with different percentages of waste foundry sands and compared with original forms by quality and environmental tests.

The results had demonstrated that it is possible to use about 10% in mass of wastes in the asphalt formularizations and in the structural ceramics. The results from the formularization of frits ceramics made with foundry wastes indicate its use as an additive in the formularization of opacity ceramics frits in concentrations between 30 and 60% in mass, depending on the requirements of the material to be produced.

Keywords: foundry sand waste, asphalt, ceramic, industrial waste.

# 1. INTRODUÇÃO

No cenário mundial a preocupação com o meio ambiente tem mostrado crescente, isto porque torna-se cada vez mais complicado e menos sustentável produzir sem preocupar-se com as reservas de matérias primas e recursos energéticos necessários para dar continuidade a produtividade. Além disso, os custos associados à gestão dos resíduos provenientes dos processos produtivos tais como manuseio, transporte, tratamento ou disposição tornam as atividades menos competitivas perante o mercado global. Neste sentido, é preciso pensar que o desenvolvimento global deve ser alcançado através de uma produtividade com qualidade e consideração com o meio ambiente.

As indústrias de fundição participam significativamente deste mercado globalizado, tendo em vista suas atividades, entre outras, nos ramos automotivo, agroindustrial, doméstico e bélico. Em contra partida, para atender a demanda destas diversas atividades também é necessário consumir matérias primas, insumos e recursos energéticos. Nas indústrias de fundição de ferro as principais matérias primas são ferro gusa, sucata de aço e ligas metálicas complementares. E os principais insumos são inoculantes, areia, pó de carvão, argilas, água e energia elétrica, GLP ou gás natural.

Desta forma, as indústrias de fundição geram resíduos. Tipicamente há a geração de uma tonelada de resíduo para cada tonelada de ferro fundido produzido (WINKLER & BOL'SHAKOV, 2000). Isto quer dizer que uma fundição que processa 2000 toneladas de ferro por mês, pode gerar 2000 toneladas de resíduos. Dentre os resíduos gerados estão as areias fenólicas ou de macharia, areias de moldagem ou areia verde, pós da exaustão de fornos e atividades de acabamento e moldagem, refratários e escória. Dentre estes, os resíduos provenientes da atividade de moldagem, areias e pó, tem especial interesse, pois podem contribuir com a maior parcela de geração de resíduos dentro de uma fundição. E, para dispor estes resíduos em um aterro, os custos são praticamente inviáveis. Para a disposição de resíduos de classe II, em células de aterros industriais classe II, pode custar aproximadamente R\$ 70,00/ton. (setenta reais), significando no caso da geração de 2000 ton/mês um custo adicional de R\$ 140.000,00 (cento e quarenta mil reais) por mês para a indústria (MARIOTTO *apud* BONET, 2002) <sup>1</sup>. Desta forma, os resíduos das etapas de quebra de canais, de exaustão e de preparo da mistura de areia de moldagem, escolhidos para este estudo, enquadraram-se como o problema principal a ser resolvido pelas fundições, considerando que o resíduo perigoso da atividade de fundição, a areia fenólica, já

---

<sup>1</sup> MARIOTTO, L.C. **Regeneração de Areias de Fundição**. São Paulo: IPT, 2001

possui processos de regeneração com altos índices de aproveitamento disponíveis no mercado.

Assim, as fundições têm buscado alternativas para a geração e disposição dos seus resíduos. Uma delas é a reciclagem interna, como por exemplo, os processos de regeneração e recuperação das areias utilizadas, reduzindo por consequência o consumo de insumos. Outra forma é a valorização dos resíduos como matéria prima de outros processos ou atividades. Em países como Estados Unidos, Bélgica, Suécia, Itália, Alemanha e Espanha já é possível encontrar aplicações do resíduo de areia de fundição como matéria prima ou aditivo em atividades do ramo de construção civil, pavimentação, compostagem e operação de aterros (AFS, 1992; EICKSTEIN, 2001; ERICKSSON, 2001; GORBEA, 2001; NAYSTROM, 2001).

As fundições adotam processos de redução/valorização relativamente similares, porém com controles que podem variar entre si, como propriedades da mistura de areia e tipo de ferro fundido desejado. Assim, a aprovação de atividades de reuso de resíduos de fundição mediante organismos ambientais regulatórios deve ser executada individualmente para cada fundição, de modo a garantir que as propriedades funcionais dos produtos obtidos a partir de resíduos não sejam alteradas durante sua vida útil e que não proporcionem impactos ambientais negativos.

Esta pesquisa se inseriu no quadro de caracterização/valorização de resíduos industriais do programa de Pós Graduação em engenharia ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina. Seus resultados visam fomentar soluções eco-compatíveis para resíduos de areias de fundição produzidas no parque industrial catarinense e brasileiro. O estudo foi realizado com areias oriundas da fundição de ferro da empresa Schulz S.A.

## **1.1 Objetivos**

Na Legislação Brasileira não existem procedimentos definidos de como utilizar resíduos como matérias primas ou insumos (SISLEG, acesso em: 10/06/04). Por isso, é preciso testá-los nas atividades desejadas para o reuso através seus procedimentos usuais de fabricação, estabelecendo desta forma um padrão comparativo para resultados. Da mesma forma, quanto aos impactos ambientais, usualmente utiliza-se as normas de classificação, através da lixiviação como referencia para determinar a periculosidade de um material no meio ambiente, e padrões de potabilidade da água para consumo como padrão para comparação.

O objetivo geral deste trabalho consistiu em avaliar a viabilidade técnica/ambiental de valorização de resíduos de areia de fundição como matéria-prima na formulação de massa asfáltica - tipo CBUQ, cerâmica vermelha e fritas cerâmicas.

Os objetivos específicos que compõem a finalidade principal são:

1. Definição de um protocolo para avaliar a condição de uso de resíduos de fundição em materiais específicos.

Este procedimento considera a definição de critérios e referências de ensaios para os materiais;

2. Avaliação experimental da qualidade de corpos de prova com diferentes concentrações de resíduos, em massa asfáltica, cerâmica vermelha e fritas cerâmicas;

Esta qualidade se refere às exigências para utilização funcional do produto acabado e às respostas ambientais dos materiais.

## ***1.2 Estrutura do Trabalho***

Este trabalho está dividido em 07 (sete) capítulos. O Capítulo 1 compreende a introdução e a definição dos objetivos do estudo. Os Capítulos 02 (dois) e 03 (três) compreendem a revisão da literatura, como parte fundamental para caracterizar os resíduos de fundição, discutir os impactos ambientais associados e experiências de valorização.

A metodologia utilizada para testar os resíduos como matéria-prima em massa asfáltica – tipo CBUQ, cerâmica vermelha e fritas cerâmicas é apresentada no Capítulo 04 (quatro), enquanto os resultados e a avaliação dos mesmos é feita no Capítulo 05 (cinco).

Por fim, no Capítulo 06 (seis) têm-se as conclusões finais e recomendações para trabalhos futuros. E posteriormente, no último Capítulo, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas neste trabalho.

## **2. CICLO DE VIDA DA AREIA DE FUNDIÇÃO**

### ***2.1 Processo de Fundição***

“Entre 1530 e 1640, efetivou-se a ocupação do Brasil. Em meio aos primeiros aventureiros e colonos chegam alguns artesãos e mestres conhecedores da arte de fundição e mineralogia. Esses artífices tinham por incumbência atender às necessidades de fornecimento de instrumentos para o trabalho na lavoura de subsistência e de peças necessárias aos estabelecimentos dos primeiros (...). No início do século XVIII, o ferro já começava a se tornar imprescindível aos povoadores para a fabricação de utensílios como fechaduras, ferrolhos, pregos, cravos, enxadas, foices, facões, pás, armas e cunhas para o aprisionamento de índios e negros” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS, 1989). Iniciava-se assim o desenvolvimento da tecnologia dos processos de fundição...

O conhecimento da fundição de metais cresceu devido a experiências de como melhor fazer os moldes e verter metais, que foi passado de geração a geração, e aperfeiçoada continuamente, sendo que hoje esta prática é um elemento essencial para a qualidade das atividades de fundição. Em 2001, segundo a ABIFA, o Brasil era o 11º produtor mundial de fundidos, produzindo quase 1.600.000 toneladas/ano, em cerca de 1000 empresas de pequeno e médio porte, empregando cerca de 40.000 trabalhadores (BONET, 2002).

Pode-se chamar de fundição o processo pelo qual se obtêm peças com a forma de um molde. “A base de todos os processos de fundição consiste em alimentar o metal líquido, na cavidade de um molde com o formato requerido seguindo-se um resfriamento a fim de produzir um objeto sólido resultante de solidificação” (CAMPOS FILHO, 1978). As operações em fundições costumam ser muito similares. A produção de peças fundidas está baseada no aquecimento de um metal (ferroso ou não ferroso) até seu estado de fusão e vazamento em moldes contendo areia de moldagem e areia de macharia (SALAMZADEK, 1985).

A fundição emprega nos seus processos modelos, moldes e machos que promovem às peças fundidas a sua conformação de acordo com as etapas existentes de moldagem, fusão e acabamento.

- a) Modelos - O modelo trata-se de uma réplica perfeita da peça que será produzida acrescida nas dimensões de material para compensar a contração e usinagem. O

modelo pode ser fabricado em madeira, metal, resinas ou outros materiais (PERINI, 1986).

- b) Machos - Algumas peças a serem fundidas podem apresentar detalhes ou cavidades. “Para que se produzam as superfícies internas em certas peças fundidas, colocam-se, no interior dos moldes de areia, peças sólidas conformadas ou machos feitos de uma mistura compatível com o metal a ser vazado e com o tamanho da peça fundida. Após o vazamento, o macho é removido do interior da peça, deixando a forma interna desejada” (KONDIC, 1973).
- c) Moldes - O molde tem por função oferecer o formato negativo da peça na qual será vazado o metal líquido. “O molde é feito por empacotamento de areia, em torno do modelo, toda a estrutura estando contida numa caixa de moldagem. O molde é feito em duas partes: uma superior (caixa superior) e outra inferior (caixa inferior)” (CAMPOS FILHO, 1978).
- d) Moldagem – No processo de moldagem a produção de uma peça fundida de projeto simples é feita através das seguintes etapas: a partir do desenho da peça, fabrica-se o modelo, em torno do qual soca-se a mistura de moldagem, contendo areia obtida em depósitos naturais e aditivos como a argila e o pó de carvão, usando-se caixas de moldagem para suportar as faces laterais do molde; remove-se o modelo, colocam-se os machos em posição, fecham-se as diferentes partes do molde e verte-se o metal na cavidade resultante (KONDIC, 1973). O material da moldagem mantém a forma da cavidade até a solidificação do metal vazado nele.
- e) Fusão - “A fusão é a passagem do estado sólido para o líquido da sucata colocada nos fornos e refino é o tratamento do metal líquido, visando acertar a composição química desejada a remoção de gases e partículas indesejáveis” (ALBA *apud* OLIVERIA, 1998). Na fusão conforme CAMPOS FILHO (1978), a provisão do metal é feita pela alimentação do metal líquido por meio de um sistema de canais existentes no molde. Os canais de alimentação alargados ou massalotes são abertos de modo a permitir que o metal escorra para a cavidade do molde. O vazamento deve ser constante impedindo a sedimentação de escória, material insolúvel do ferro, no interior do molde. A remoção da escória consiste no ato de retirar durante a fusão e no momento do vazamento todo o material indesejado que se forma na parte superior do metal líquido. Muitas vezes deixa-se uma camada inferior a 1 cm de escória, para proteger o banho (ALBA *apud* OLIVERIA, 1998).
- f) Acabamento - Após a solidificação e resfriamento a peça passa pelo processo de desmoldagem, através da vibração do conjunto de moldagem para retirar a mistura



de areia e posteriores etapas do acabamento. A areia é removida e a limpeza é operacionalizada através de jateamento, escovação e esmerilhão, a qual proporciona a usinagem superficial da peça. A quebra de canais consiste no ato de colocar a peça em local adequado para então quebrar manualmente, com marreta e martelo, os canais e massalotes, que não fazem parte da peça e que são classificados como sucata. O jateamento com granalha de aço consiste em colocar a peça, já sem canais e massalotes em uma câmara na qual se realiza o jateamento com granalha de aço (pequenas esferas de aço) a fim de deixar a peça mais limpa. No acabamento final a escovação e a esmerilhão consiste na remoção de rebarbas (restos de metais que aparecem nas peças fora das dimensões da peça desejada) através do uso de esmeris (*ALBA apud OLIVEIRA, 1998*)<sup>1</sup>.

Conforme OLIVEIRA (1998), o fluxograma do processo de fundição pode ser visualizado na Figura 2.1, apresentada abaixo:

---

<sup>1</sup> ALBA Química Indústria e Comércio Ltda. **Resinas sintéticas para fundição**. Itaúna, MG, 1989

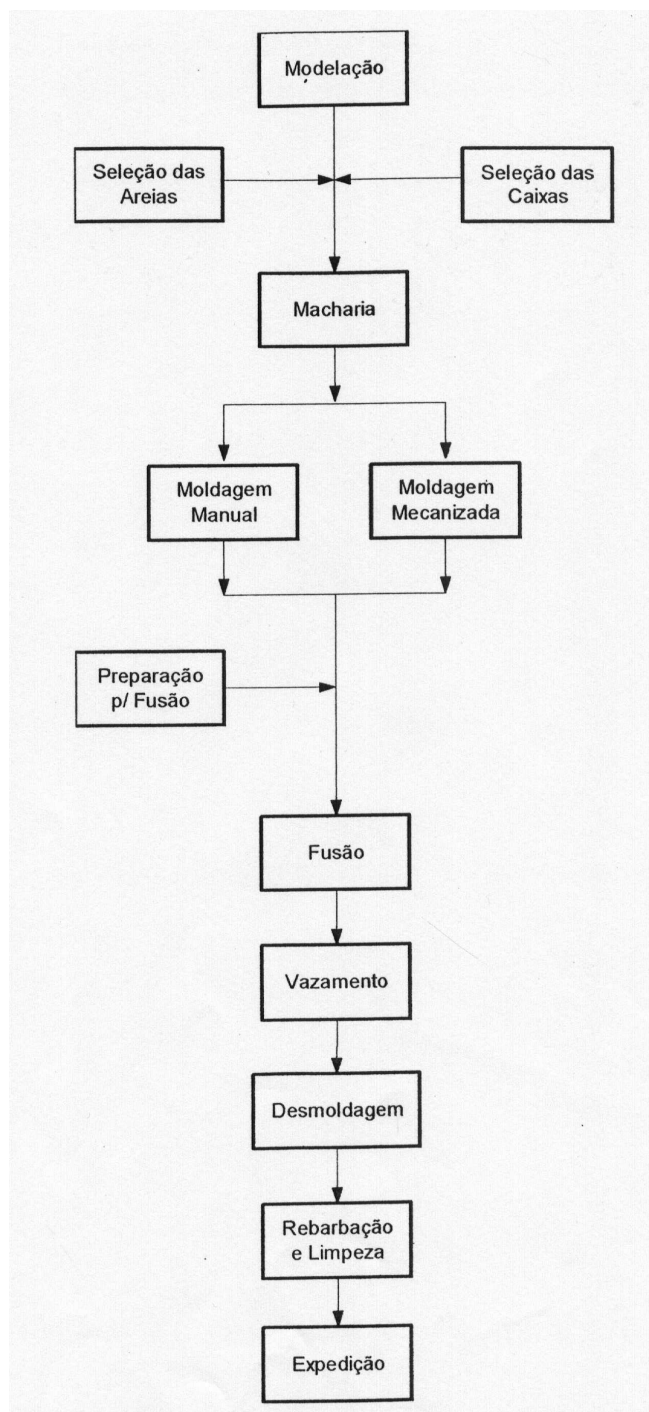


Figura 2.1 Fluxograma do Processo de Fundição.

Fonte: OLIVEIRA (1998)

## **2.2 Resíduos Gerados no Processo de Fundição**

A produção de ferro gera grande quantidade de resíduos que são principalmente aterrados e poucas vezes reutilizados (SKVÁRA *et al.*, 2002). Além dos resíduos gerados diretamente pelo processo de moldagem, Oliveira (1998) destaca ainda outros resíduos provenientes do processo de fundição como: escória de fundição, areia de machos e moldes, sucata de ferro, material particulado e vapores tóxicos dos fornos (Figura 2.2).

A geração anual de resíduos de fundição, incluindo pós e areia, nos Estados Unidos pode alcançar 13 milhões de toneladas (WINKLER & BOL'SHAKOV, 2000). No Brasil os excedentes, somente de areia de fundição por ano no estado do São Paulo, estão estimados em 1,5 milhões de toneladas (MARIOTTO, 2001) e, considerando outros estados este volume poderia dobrar, exigindo a mesma quantidade a ser extraída pela mineração de areia nova (WATANABE *et al.*, 2002).

A cada ano as indústrias americanas de fundição utilizam cerca de 5 milhões de toneladas de areia em processos de moldagem (BASTIAN & ALLEMAN, 1998).

Este estudo traz uma abordagem voltada para as características dos resíduos de areia de moldagem porque, de todos os resíduos gerados no processo de fundição, estes possuem a maior geração. Tipicamente, cerca de uma tonelada de areia é requerida para cada tonelada de ferro ou aço produzido (WINKLER & BOL'SHAKOV, 2000).

No processo produtivo após o resfriamento do metal, a areia é separada do fundido e as fundições tentam reciclar o máximo possível de areia novamente para o sistema (BASTIAN & ALLEMAN, 1998). Para manter constante a quantidade total de areia em processamento na fundição é preciso descartar regularmente uma quantidade de areia usada equivalente à quantidade de areia nova comprada. A areia a ser descartada é colhida em um ponto conveniente do sistema de transporte interno. Os pedaços de machos que não se desagregam totalmente (torrões) e que ficam retidos em uma peneira rotativa também são eliminados (WATANABE *et al.*, 2002).

Conforme MARIOTTO (2001) o sistema de areia recebe nova quantidade para produzir machos e moldes. Para que o volume total de areia não aumente, é necessário descartar o excedente. Areia e ligantes são adicionados para manter a qualidade do fundido e para repor a areia perdida durante as operações normais (WINKLER *et al.*, 2000).

Assim, os diferentes tipos de resíduos gerados variam em quantidade, em características físicas e químicas e, em função da variabilidade existente em cada resíduo, seu potencial para reuso ou reciclagem também será variável. A medição das quantidades geradas de cada tipo de resíduo, além do conhecimento de suas propriedades químicas e

físicas, é de especial importância na análise de opções de reuso ou reciclagem (SMITH & KUNES, 1983).

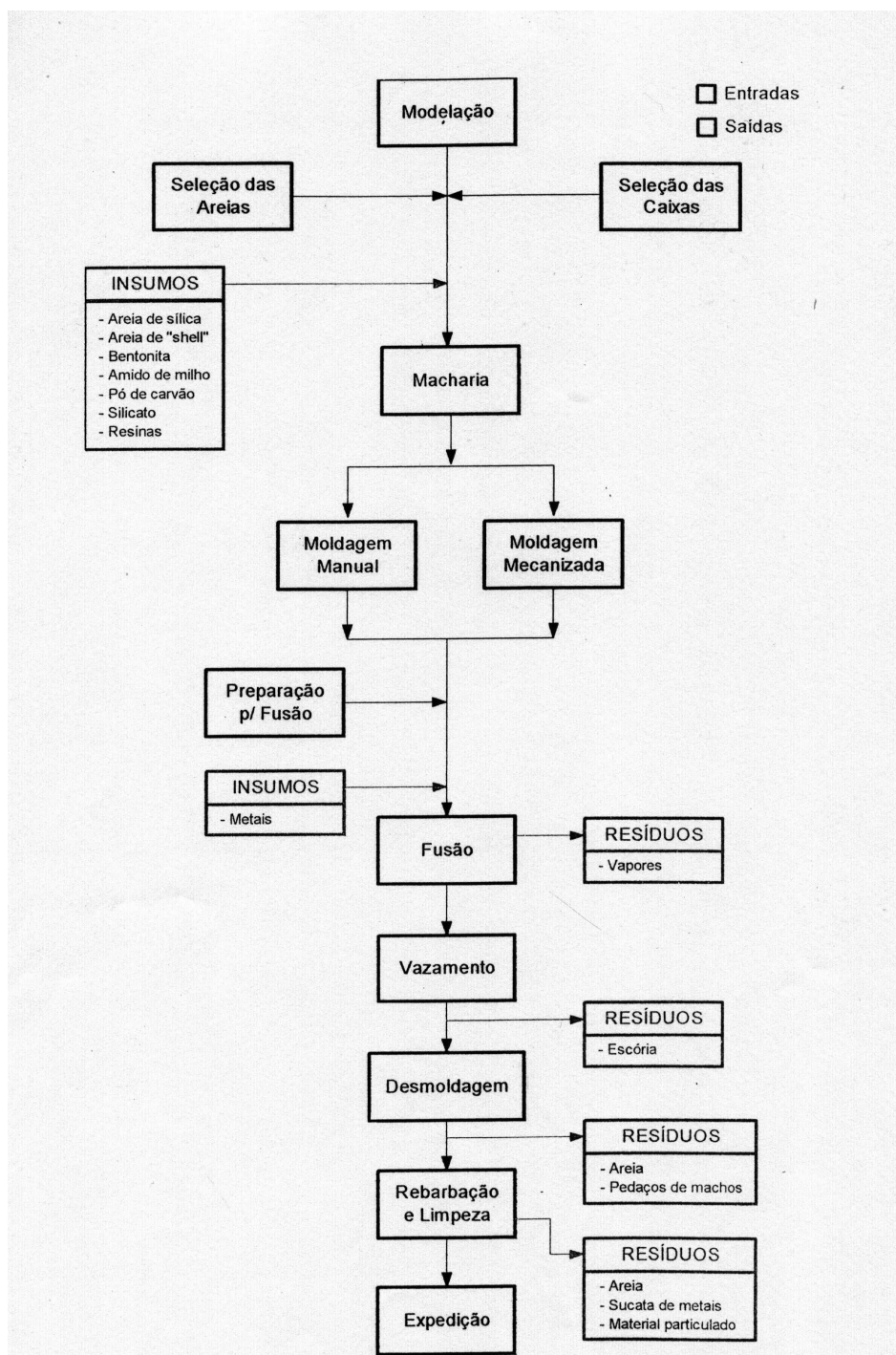


Figura 2.2 Fluxograma do Processo de Fundição com Entradas e Saídas.

Fonte: OLIVEIRA (1998)

## 2.3 Caracterização da Areia de Fundição

A caracterização das areias de fundição com o objetivo de estudar a possibilidade de reuso ou reciclagem é dada em função do conhecimento de todas as suas características. Neste processo, inclui-se desde a determinação do seu uso, passando pelo conhecimento das suas propriedades físicas ou mecânicas, chegando até sua composição química. Para Winkler & Bol'shakov (2000), os resultados de um estudo completo de caracterização deveriam incluir também uma caracterização microbiológica do resíduo, estimativas de tratamento, necessidades de disposição, avaliação de risco, oportunidades de minimização, reuso, reciclagem, análise de ciclo de vida e custos efetivos.

Conforme *Lo Ré apud Bonet* (2002)<sup>2</sup>, a areia utilizada no processo de fundição pode ser classificada quanto a sua origem, uso, emprego na caixa de fundição e tipo de metal:

a) Quanto a origem, as areias podem ser:

- Areias Naturais, que são originadas de arenitos de cimento argiloso ou de alteração de rochas feldspáticas (saibros), que são usados diretamente na moldagem, sofrendo apenas uma correção na umidade;
- Areias Semi-sintéticas, que são resultantes das modificações introduzidas nas areias naturais, por meio de adição de substâncias que visam corrigi-las, melhorando suas qualidades;
- Areias Sintéticas, que são obtidas pela mistura correta da areia-base e aglomerantes em proporção adequada e umidade determinada.

b) Quanto ao uso, podem ser:

- Areia nova, quando utilizada pela primeira vez na fundição;
- Areia usada, quando recuperada de fundições anteriores;

c) Quanto ao emprego na caixa de fundição, podem ser:

- Areia de faceamento, que é a parte da areia que fazia o modelo e entra em contato com o metal de vazamento;
- Areia de enchimento, que é a parte da areia que constitui o restante da caixa de moldagem;
- Areia de macho, que é aquela destinada ao preparo dos machos, conformadores das cavidades internas das peças.

---

<sup>2</sup> LO RÉ, V. Areias de Fundição: generalidades, classificação, técnicas de preparo, componentes. In: **Fundição**. SIEGEL coord. Associação Brasileira de Metais- ABM. 10 ed. Aula n.8, 1978.

d) Quanto ao tipo do metal, podem ser:

- Areias para metais ferrosos (ferro de fundido cinzento, maleável e aço);
- Areia para metais não ferrosos (bronze e latão, cobre e níquel, alumínio, e magnésio).

“A areia de moldagem corresponde ao maior volume de resíduos gerados pela Indústria de Fundição, com características quantitativas e qualitativas diferenciadas em função das peculiaridades de cada processo em particular ” (BIOLO, 2003).

Uma segunda categoria de resíduos que tem especial interesse, é a proveniente das emissões do sistema de exaustão de areia, pois ocorrem variações nas propriedades físico-químicas da areia interferindo nos processos de reuso ou reciclagem (SMITH & KUNES, 1983).

Para obter o formato desejado da peça pode-se utilizar de vários processos de moldagem, tais como: moldagem em casca à quente; moldagem CO<sub>2</sub>; moldagem à frio e moldagem em areia a verde. Este último processo responde pela maior parcela de peças fundidas produzidas em todo o mundo, sendo que no Brasil 80% das fundições utilizam areias verdes, apontado por *SENAI apud Bonet (2002)*<sup>3</sup>.

Para Bastian & Alleman (1998), a maior parte do resíduo de moldagem é constituído de areia, geralmente sílica, olivina, zircônio, cromita e outras areias básicas utilizadas. A sílica é composta do mineral de quartzo (SiO<sub>2</sub>), com ponto de fusão de aproximadamente 3.090 °F, sendo que a adição de outros minerais ou resíduos altera sua sinterização. Desta forma, areia de fundição contém outros componentes incluindo: argilas, carvão, derivados do petróleo e outros produtos químicos orgânicos.

A areia utilizada para a moldagem é geralmente um material com partículas uniformes, normalmente entre 0,1 e 0,5 mm de diâmetro. Dos resíduos de areia de fundição, todo o material passa pela peneira 0,6 mm, mais de 50% das partículas passa pela peneira 0,3mm, sendo que a maioria é retida pela peneira de 0,15mm. O material fino, passado pela peneira de 0,2 mm representa cerca de 20% do resíduo de fundição (WINKLER & BOL'SHAKOV, 2000).

A composição típica de uma mistura de areia ver é apresentada na Tabela 2.1, conforme descrito no Foundry Sand Beneficial Reuse Manual - Special Report, (1996):

---

<sup>3</sup> SENAI – Departamento Regional de Minas Gerais. **Areias de Fundição Aglomeradas com Argila**. 2<sup>a</sup> ed. Belo Horizonte: SENAI, v. I, II, III, IV, 1987.

Tabela 2.1 Composição típica e propriedades da Areia Verde.

<b>Componente/Propriedade</b>	<b>Limites</b>
Areia	70-80%
Água	2-4%
Argila	5-15%
Aditivos	2-5%
Umidade	0-4%
Perda ao Fogo	0,2-8%
pH	3-12
Argila AFS	40-150
% Finos ( passado pela peneira 200 Mesh)	1-2%
Densidade	1,0 –1,6 g/cm3

Fonte: adaptado de Foundry Sand Beneficial Reuse Manual - Special Report, (1996)

Assim, os resíduos de areia de fundição, constituem-se basicamente de uma mistura contendo areia (em geral sílica), argila, carvão e material fino. Dependendo do ligante de do metal fundido, o pH da areia de fundição pode ser entre 4-8.

De acordo com Winkler & Bol'shakov (2000), os resíduos de fundição são também tipicamente caracterizados pelo peso específico, permeabilidade e absorção . Para a American Foundrymen's Society – AFS (2003), as propriedades típicas para a areia de fundição seguem a Tabela 2.2:

Tabela 2.2 Propriedades do Resíduo de Areia de Fundição.

<b>Propriedade</b>	<b>Limites</b>	<b>Método</b>
Peso Específico	2,39-2,55	ASTM D854
Absorção, %	0,45	ASTM C128
Argila e Partículas finas	1-44	ASTM C142/AASHTO T112
Coeficiente de Permeabilidade, cm/sec	10 <sup>-3</sup> – 10 <sup>-6</sup>	ASTM T215/ASTMD2434
Limite de Plasticidade	Não plástica	ASTM D4318/AASHTO T90

Fonte: adaptado de American Foundrymen Society (2003)

Winkler & Bol'shakov (2000), relatam que as areias de fundição ainda virgens constituem um material uniforme, contudo após a fundição a areia freqüentemente contém metais, moldes e machos contendo ligantes parcialmente degradados. Na Tabela 2.3 é apresentada a composição química de uma amostra de resíduo de areia de fundição com os seguintes resultados:

Tabela 2.3 Composição química da Areia de Fundição por Fluorescência de Raios-X.

<b>Constituinte</b>	<b>Percentagem (%)</b>
SiO <sub>2</sub>	87,91
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,70
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,94
CaO	0,14
MgO	0,30
SO <sub>3</sub>	0,09
Na <sub>2</sub> O	0,19
K <sub>2</sub> O	0,25
TiO <sub>2</sub>	0,15
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,00
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02
SrO	0,03
Perda ao Fogo	5,15

Fonte: adaptado de WINKLER & BOL'SHAKOV (2000)

Biolo (2003), diz que dependendo do ligante empregado, uma areia de fundição pode ser classificada como resíduo não inerte ou perigoso, através dos padrões indicados pelas normas utilizadas para classificação de um resíduo: as NBRs 10.004, 10.005 e 10.006. Para determinar suas propriedades no meio ambiente, a areia de fundição tem sido extensivamente testada através das normas de lixiviação. Assim, os resíduos de fundição podem ser extremamente complexos na sua composição e na determinação do seu lixiviado, isto porque os a investigação dos constituintes orgânicos encontra-se no uso de ligantes complexos ou pela sua decomposição durante o processo de fundição (BASTIAN & ALLEMAN, 1998).

Os resultados de teste de lixiviação indicam que as matérias primas utilizadas na fundição e os ligantes são particularmente importantes na determinação das características



do lixiviado. Além disso, é importante também considerar o tamanho das partículas, sendo que estas poderão influenciar a quantidade lixiviada por peso do resíduo (BOYLE & HAM, 1990).

Entretanto, a execução de testes específicos para cada uma destas espécies químicas pode ser custosa e não fornecer informações suficientes sobre o potencial de complicações causadas pelo seu sinergismo( BASTIAN & ALLEMAN, 1998). Além disso, os resultados das análises feitas em laboratório dependem significativamente do tipo de procedimento que é aplicado no ensaio de lixiviação (WINKLER & BOL'SHAKOV, 2000).

Resultados de testes de lixiviação executados por Boyle *et al.* (1989), através da AFS indicam que a concentrações dos parâmetros analisados encontraram-se dentro dos padrões para águas potáveis, e que, na média, apenas os parâmetros de ferro e manganês excederam os padrões de potabilidade. Contudo, ao comparar-se os lixiviados obtidos para as amostras de fundição com lixiviados de solos naturais, sem contaminação, verificou-se resultados semelhantes ao do resíduo ou em alguns casos índices maiores para os parâmetros de ferro e manganês.

Os resultados alcançados nas pesquisas de Winkler & Bol'shakov (2000) indicam que as quantidades de metais presentes nas areias de fundição são da mesma ordem de magnitude que solos naturais e que freqüentemente encontra-se uma menor quantidade de metal na areia, comparado ao solo. Quanto aos constituintes orgânicos, a areia verde apresenta um baixo potencial de lixiviação, comparando-se com areias quimicamente ligadas ou machos. Como a maior parte dos resíduos de fundição é caracterizado pela areia verde, raramente os compostos orgânicos são analisados. Contudo, os resultados de laboratório indicam que uma ampla variedade de compostos orgânicos estão presentes nos lixiviados dos resíduos e que a maioria se apresenta em baixas concentrações. Mesmo assim nenhuma das amostras teve resultados acima dos limites de toxicidade permitidos.

Para Walden (2003), areia de fundição é considerada apenas um resíduo sólido, mas não um resíduo perigoso, por não apresentar qualquer característica de toxicidade e não conter constituintes perigosos de acordo com a legislação.

Desta forma, os resíduos de areia de fundição teriam um pequeno potencial de contaminação das águas subterrâneas (BOYLE & HAM, 1990).

## **2.4 Impactos Ambientais da Areia de Fundição**

Dos resíduos gerados no processo de fundição, é importante diferenciar as areias de moldagem das areias da macharia, apresentado na seção 2.2 Resíduos Gerados no Processo de Fundição. As areias de moldagem são compostas por areia, bentonita e pó de carvão, e não possuem potencial de lixiviação de constituintes perigosos ou tóxicos. Já para as areias de macharia, compostas por ligantes a base de resinas fenólicas que possuem toxicidade, é possível que a sua disposição afete a qualidade do solo e de águas subterrâneas, dependendo das quantidades envolvidas e lixiviadas (WINKLER & BOL'SHAKOV, 2000).

Boyle & Ham (1990), descreveram que os resíduos de fundição em um aterro não controlado são expostos à percolação através do resíduo, lixiviando ou dissolvendo os constituintes solúveis possibilitando a contaminação do lençol freático.

Salamzadek (1985), explica que em um aterro de fundição, uma grande quantidade de resíduos é relativamente inerte e que não seriam esperados sérios problemas ambientais na qualidade da água subterrânea.

Por isso, Bonet (2002), Biolo (2003) e Watanabe *et al.* (2002), concordam que a areia de moldagem, resultante da desmoldagem de peças metálicas e de excedentes do processo, constitui-se em um grande problema ambiental para as empresas do setor metal mecânico por ser um resíduo classificado como não inerte e pelo fator principal da disposição de grandes quantidades em aterros, e que seus impactos ambientais estariam ligados ao consumo dos recursos naturais (areia, bentonita, pó de carvão) e à criação de locais para aterro, provocando a desertificação de áreas de preservação, proteção ambiental ou produtivas. Adicionalmente, a implementação de regulamentos ambientais mais restritivos nos últimos anos tem obrigado as fundições a destinar seus excedentes de areia para aterros controlados, muitas vezes distantes até 200 km, onerando consideravelmente seus custos.

No estado de São Paulo, por exemplo, o custo para disposição é de até 180 reais por tonelada para areias classificadas como resíduo classe I (perigoso), e de até 70 reais por tonelada para classe II (não inerte) (MARIOTTO *apud* BONET, 2002)<sup>4</sup>. A variação do custo de disposição em aterros licenciados está atrelada, além de sua classificação, na quantidade a ser disposta.

---

<sup>4</sup> MARIOTTO, L.C. **Regeneração de Areias de Fundição**. São Paulo: IPT, 2001.

Deste ponto Bonet (2002), afirma que praticamente não existe atividade econômica industrial sem impacto ambiental, pois todo e qualquer processo industrial consome matéria-prima ou insumos, que direta ou indiretamente vem da natureza. Esses processos geram resíduos que nem sempre podem ser reaproveitados. Porém, as empresas estão descobrindo que investir no reaproveitamento dos seus resíduos pode ser um negócio rentável, além de ecologicamente correto.

Para Wright (2001), 90% da areia de fundição é disposta em aterros como resíduos não perigosos. Entretanto, aspectos ambientais e econômicos têm demonstrado que fazer dos resíduos um atrativo do processo de fundição é uma maneira apropriada de reutilizá-los. E, das pesquisas complementares de Winkler & Bol'shakov (2000), os resultados indicaram também que as areias de fundição poderiam ser beneficiadas através de reuso sem causar impactos ao meio ambiente ou riscos a saúde humana.

Para minimizar os custos de disposição do resíduo areia fundição em aterros industriais e seus impactos ambientais, as fundições poderiam adotar medidas que favorecessem a utilização externa dos resíduos das areias de fundição, por exemplo, em substituição parcial do agregado fino nos concretos de baixo custo e nos pavimentos asfálticos. As fundições também devem regenerar as areias, através de tratamentos mecânicos e/ou tratamentos térmicos, com o objetivo de reconduzir a areia usada a uma condição semelhante à de uma areia nova, permitindo a sua reutilização no processo sem afetar a qualidade dos moldes produzidos (BONET, 2002)

Como declaram Winkler & Bol'shakov (2000), "entender as características do resíduo é fundamental para selecionar, projetar e implementar as soluções do gerenciamento de resíduos nas fundições. Assim, um claro entendimento dos resíduos resultaria em projetos sustentáveis e decisões regulatórias relativas ao reuso de areia de fundição minimizando os impactos ambientais e maximizando a economia".

### **3. VALORIZAÇÃO DE AREIAS DE FUNDIÇÃO**

#### ***3.1 Regeneração e Recuperação de Areia***

Como já visto anteriormente, a medida inicial a ser tomada por uma fundição quanto à geração de seus resíduos é reduzi-la, considerando as quantidades de material a ser tratado ou disposto. Assim, as fundições têm adotado processos de regeneração ou recuperação de areia para o melhor aproveitamento ou uso de suas matérias primas.

Este repetido uso de areia dentro da mesma fundição é entendido como uma reciclagem interna. Estes processos, recuperação e regeneração, são popularmente conhecidos como “Sand Reclamation” ou Reparação/Correção da Areia. Os processos de reciclagem requerem equipamentos específicos que restabelecem a qualidade da areia gasta de modo adequado para promover seu uso na moldagem ou macharia. A reciclagem da areia é um processo de restauração das condições de durabilidade do material gasto para ser usado na sua função original. Certa quantidade de areia é descartada durante o processo de reciclagem em virtude da redução do tamanho das partículas impedindo o uso de partículas mais finas nos processos de moldagem e macharia (WINKLER & BOL'SHAKOV, 2000).

No Brasil, é possível obter informações a partir de Mariotto (2000), que diz basicamente que a reciclagem de uma areia de fundição implica a limpeza superficial de seus grãos e a remoção das partículas resultantes dessa limpeza, com o objetivo de reconduzir a areia usada a uma nova condição, permitindo seu uso no processo, sem detrimento das qualidades dos moldes ou machos produzidos. Os procedimentos mais utilizados para isso são por atrição a seco ou úmido, chamados de recuperação, e de calcinação, propriamente chamados de regeneração.

Nos processos de recuperação os materiais aderentes aos grãos de areia são retirados através de impactos, pela fragmentação mecânica entre os grãos e o equipamento ou através da agitação de uma suspensão da areia em água (MARIOTTO, 2000). Durante a fusão, quando o metal líquido é vazado no molde de areia parte da bentonita da mistura é transformada em não ativa (olítica) e parte do carbono proveniente do pó de carvão é queimado. No sistema de areia, uma quantidade de areia nova, carbono e bentonita são adicionados para compensar essas perdas. Um sistema de recuperação de areia pode separar os grãos de quartzo da areia dos finos da areia de moldagem. No tambor rotatório é

removida a bentonita não ativa da areia. A camada de bentonita e outros ligantes são retirados das partículas de areia através de um sistema de exaustão (GIELISSEN, 2001).

Já no processo de regeneração, a areia é calcinada em fornos rotativos ou em câmaras de leito fluidizado para a remoção de compostos orgânicos (MARIOTTO, 2000). O processo de regeneração permite novamente o uso da areia diretamente no processo de fundição, reduzindo consideravelmente a compra de nova areia e sua disposição (VISENTINI, *et al.* 2001).

Para Winkler *et al.* (1999), Smith *et al.* (1982) e Gielissen (2001) as fundições que usam o processo de moldagem em areia verde poderiam se beneficiar da aquisição do seu próprio sistema de recuperação ou regeneração. Considerando que estes sistemas recuperam toda a areia, exceto pequenas quantidades perdidas no chão, as fundições deveriam comparar o custo investido na compra de uma unidade de recuperação com os custos da disposição anual mais os custos de aquisição de areia nova, incluindo a viabilidade do projeto perante a produção, o layout das instalações e os impactos dos resíduos gerados da reparação considerando os requerimentos para reuso ou disposição final.

Outra opção para as fundições é dividir uma unidade ou utilizar o sistema de recuperação de outra companhia, sendo necessário o balanço dos custos de transporte envolvidos, bem como a localização dos envolvidos. Uma unidade de regeneração poderia operar de um local central e ser economicamente viável desde que satisfatórios os custos de envio (WINKLER, 1999).

Assim conforme Gielissen (2001), com a recuperação a quantidade total de resíduo gerada por tonelada de fundido produzido reduz através dos anos.

Na Itália, em uma planta de reaproveitamento de areia - Safond, são reaproveitadas aproximadamente 230.000 toneladas por ano de areia de fundição, geradas de 123 clientes, dentre eles fundições de ferro e aço (RIVE, 2001). Na Holanda, na De Globe, a quantidade de areia de fundição foi reduzida de 20.000 toneladas por ano para 6.000 toneladas por ano (GIELISSEN, 2001). No Brasil, a ABIFA (Associação Brasileira de Fundição) e a ABM (Associação Brasileira de Metalurgia) ainda não possuem dados especificando a quantidade de empresas que estariam utilizando processos de regeneração e/ou recuperação( ABIFA, acesso em: 10/06/2004) (ABM, acesso em: 10/06/2004).

Para Matos (1997), mesmo que as técnicas de regeneração/recuperação tenham por objetivo processar a areia para permitir seu reaproveitamento na fundição ainda existem aspectos ambientais como a geração de outros poluentes dentro destes processos que mostram desvantagens nesta alternativa. A geração de resíduos sólidos nos processos de

regeneração ou recuperação pode variar significativamente, dentro de uma faixa de 2% até 75%. Além do alto investimento para sua instalação, a grande diversidade das características das areias decorrentes de diferentes processos de moldagem e macharia fazem com que seja necessária a composição de várias etapas de tratamento.

Neste sentido, tornou-se necessário aos fundidores alternativas, além da redução na geração pelos processos de recuperação e regeneração, para seus resíduos, em especial aqueles decorrentes das atividades de moldagem e desmoldagem, por gerarem maior quantidade. Estas alternativas têm sido encontradas nas aplicações de reuso, ou seja, a utilização dos resíduos em processos diferenciados dos da sua geração. Alguns exemplos poderão ser vistos a seguir em aplicações dentre elas na construção civil, na fabricação de massas asfálticas para rodovias ou como coberturas para aterros.

### **3.2 Utilização para Aterros Sanitários e Industriais**

A cobertura final de aterros é uma das mais importantes ações de proteção ambiental para reduzir a dispersão dos poluentes através da redução da quantidade de água que penetra ao longo do aterro. Na Europa, assim como no resto do mundo, existem vários aterros em atividades para serem cobertos. Em adição existe também um grande número de antigos aterros que precisam ser cobertos (NAYSTROM, 2001).

Conforme Walden (2003) e Abichou *et al.* (acesso em: 18/02/2003), em virtude de a areia verde ser uma mistura de areia e bentonita, ela pode ser utilizada como de barreira hidráulica na construção das camadas utilizadas na cobertura de aterros ou como revestimento.

De acordo com o relatado por Smith *et al.* (1983), este tipo de uso funcionará apenas se a fundição puder demonstrar através de testes químicos e físicos que este resíduo é compatível com esta atividade e que técnicas de manejo possam ser adequadamente implementadas para garantir que resíduos indesejáveis não sejam misturados com o resíduo que será utilizado no aterro municipal. Aterros de resíduos de fundição são diferentes de aterros de resíduos municipais em função da natureza dos resíduos que são produzidos na fundição.

Desta forma, o uso de areias em aplicações geotécnicas como em aterros requer características hidráulicas específicas, incluindo a habilidade em transmitir água e/ou agir como uma barreira de drenagem. A argila ativa, encontrada particularmente nas areias verde, inibe a transmissão de umidade (WINKLER, 1999).

Os testes realizados por Abichou *et al.* (acesso em: 18/02/2003) incluíram a comparação das propriedades de permeabilidade, condutividade hidráulica e compactação da areia de fundição perante a uma mistura de argila e areia comumente utilizada em aplicações geotécnicas. Os resultados demonstraram que as coberturas executadas com areia de fundição tiveram melhor desempenho do que aquelas construídas com a mistura geotécnica usual. A percolação dos resíduos também foi significativamente mais baixa, considerando sua avaliação durante todas as estações do ano. Além disso, O tamanho das partículas e a qualidade dos nutrientes são outras características que precisam ser examinadas. Técnicas apropriadas de horticulturas também devem ser utilizadas para ter sucesso nesta metodologia (SMITH *et al.*, 1982).

Na execução e design da barreira é necessário que a compactação da areia seja superior aquela aplicada nos processos de moldagem. Este é um ponto crítico, considerando que o solo pode não ser estável. Os resultados dos testes de Naystrom (2001), concluíram que a areia de fundição é excelente como barreira hidráulica assumindo-se os valores de conteúdo de bentonita maior que 8%; compactação maior que 80% e umidade aproximada de 10%.

A pesquisa de Regan *et al.* (1997), indica que na Pensilvânia, as principais necessidades para a cobertura diária são: produtividade de 25-55%; manter uma inclinação de 3% e ser capaz de suportar vegetação.

Aparentemente todas as fundições teriam vantagens nesta aplicação. Um aterro de 100 acres utiliza aproximadamente 1700 toneladas de material para cobertura. Uma grande quantidade é necessária para a cobertura final, quando o aterro é finalizado ou encerrado. Por outro lado, Winkler (1999), informa que resíduos de areia de fundição geralmente atendem as características para cobertura final em aterros sanitários que requerem aproximadamente 225 toneladas de areia de fundição para cada acre (4.046, 825 m<sup>2</sup>) a ser coberto.

O custo total para cobertura no depósito é afetado por um número de fatores. Os mais importantes são: a distância para transporte, os valores dos materiais e o tamanho da área a ser coberta. (NAYSTROM, 2001). No geral, pode-se dizer que como a areia de fundição pode oferecer uma barreira superior que o material convencional, possibilita custos mais baixos.

Em Indiana, EUA, a areia de fundição é classificada como um material alternativo para cobertura de aterro e uma lista de aterros municipais com permissão para utilizá-la pode ser obtida através do departamento de gerenciamento de resíduos sólidos da agência de gerenciamento ambiental (IDEM, 1998).

Na Suécia, a Volvo PowerTrain Foundry, participa de projetos para alternativas para o reuso de areias de fundição. Um deles é a cobertura de aterros sanitários, utilizando as propriedades ligantes da argila ativa para dar uma camada de baixa permeabilidade (ERIKSSON, 2001).

No Brasil, os aterros licenciados poderiam beneficiar-se desta alternativa, realizando pesquisas e trabalhando em conjunto com os fundidores para reduzir os custos da disposição de resíduos de fundição.

### **3.3 Fabricação de Asfalto**

A pavimentação de estradas de rodagem com revestimentos asfálticos tem grande importância no Brasil, onde grande parte da carga ainda é transportada por caminhões (56%) em vez de barcos e trens, como na Europa e Estados Unidos (NUNES *et al.*, 2003).

As aplicações de pavimentos podem ser divididas em 05 categorias maiores: nas aplicações em pavimento asfáltico, em cimento Portland, em camadas de preenchimento, em aplicações de bases estabilizadas e em agregados soltos ou aplicações de enchimento (U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, acesso em: 29/10/2003). Nesta seção serão comentados apenas os aspectos voltados para a pavimentação asfáltica.

O termo asfalto descreve um material de construção produzido tecnicamente de betume e minerais de diferentes tamanhos como filler, areia, e brita (ECKSTEIN, 2001).

Para Bonet (2002), “O pavimento rodoviário é uma estrutura, assente sobre uma fundição apropriada que tem por finalidade propiciar uma superfície de rolamento que permita o tráfego seguro e confortável de veículos nas velocidades operacionais desejadas e sob quaisquer condições climáticas”.

Na NBR 7207/82 da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) pode encontrar a definição do pavimento como uma estrutura construída após a terraplenagem e destinada, econômica e simultaneamente, em seu conjunto a:

- a) resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego;
- b) melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança;
- c) resistir aos esforços horizontais que nela atuam, tomando mais durável a superfície de rolamento.



Segundo *Felippe & Castro apud Bonet (2002)*<sup>1</sup>, um projeto de uma mistura de concreto asfáltico consiste em determinar o traço da mistura, ou seja:

- a) determinar a porcentagem dos diversos agregados minerais utilizados;
- b) determinar a porcentagem de asfalto, de maneira a satisfazer requisitos mínimos de estabilidade determinada pelas especificações.

Desta forma, verificando os estudos de Bonet (2002), pode-se descrever os principais aspectos relativos aos pavimentos:

Os pavimentos podem ser classificados em flexíveis, rígidos e mistos ou semi-rígidos.

a) Pavimentos rígidos – São aqueles constituídos por camadas, trabalhando essencialmente à tração, tipificados pelos pavimentos de concreto de cimento;

b) Pavimentos flexíveis – São aqueles pavimentos constituídos por uma camada de revestimento e uma outra de base granular, sobre o subleito.

Desta forma, as camadas do pavimento dividem-se em revestimento asfáltico, base, e sub-base. Os revestimentos asfálticos podem ser executados por penetração ou mistura. Desta forma pode ter para o revestimento asfáltico tratamentos superficiais, macadames betuminosos, pré-misturas a quente (PMQ), pré-misturas a frio (PMF) e concretos betuminosos usinados a quente (CBUQ).

Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), é um revestimento flexível, resultante da mistura a quente, em usina apropriada, de agregado graúdo, agregado miúdo, material de enchimento (*filler* – eventualmente) e cimento asfáltico de petróleo (CAP) de acordo com proporções definidas previamente em laboratório, de forma a atender os requisitos granulométricos, de densidade, de vazios e de resistência, compatíveis com padrões preestabelecidos. Um concreto betuminoso se caracteriza pelo fato de que a operação de mistura é precedida pelo aquecimento de seus componentes à temperaturas elevadas (entre 140° C e 180° C), e sua distribuição e compactação na pista serem também precedidas estando a mistura em temperaturas entre 80° C e 140° C. Devido a ligação entre agregados, os CBUQs são capazes de resistir bem às ações mecânicas de desagregação produzida pelos os veículos.

Resíduos ou subprodutos que são usados em aplicações para pavimentos são geralmente utilizados como um material substituinte de fillers, agregados de concreto, modificadores de cimento para asfalto, minerais para misturas de cimento Portland,

---

<sup>1</sup> FELIPPE, L.T.P.; CASTRO, P.C.G; Concreto Asfáltico: **Separata do Boletim do DAER**. Planus Artes Gráficas, 1970

agregados de enchimento e agregados granulares (U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, acesso em: 29/10/2003).

Resíduos de areia de fundição têm sido usados como um substituto para os agregados miúdos em misturas de pavimento asfáltico. Para o uso, os resíduos requerem trituração ou peneiramento para reduzir ou separar os materiais fora do tamanho que podem estar presentes (AFS, acesso em: 13/08/2003).

A indústria de asfalto define areia, como um material granular com determinadas características físicas e químicas, e não devem ser constituídas por caroços grandes, pó, barro ou subprodutos de fundição. As empresas de fundição costumam usar a representação de areia retida em cada tela. Já a indústria asfáltica usa a representação, porcentagem que passa em cada peneira como uma curva sumária. Se a areia de fundição tiver uma granulometria que não se enquadre diretamente no traço asfáltico, esse problema pode ser corrigido, misturando-se outro material mais graúdo ou miúdo, que deve e poderá ser considerado pela indústria de asfalto (LEIDEL, 1993).

O agregado miúdo pode ser areia, pó de pedra ou mistura de ambos. Suas partículas individuais deverão ser resistentes, e apresentar moderada angulosidade, livres de argilas e substâncias nocivas. A indústria de asfalto frequentemente prefere agregados angulares invés da forma arredondada usada nas fundições, e esta é uma característica importante na composição da massa asfáltica, mas que não chega a eliminar o uso dos resíduos de areias de fundição (LEIDEL, 1993).

Uma areia de fundição nova sempre tem uma forma arredondada, com uma superfície lisa. Esta característica é desejável nos processos de moldagem, porém não é desejável na indústria de construção, em virtude de uma superfície lisa não permitir a integração entre os grãos. Contudo, pode-se controlar este efeito através da substituição de até 50% da areia necessária para a mistura de asfalto com o resíduo de areia (ECKSTEIN, 2001).

De qualquer forma, a mistura com o material grosseiro é necessária para obter a análise granulométrica por peneiramento. A forma do grão é de importância, pois o arredondamento é considerado uma característica negativa porque torna o asfalto flexível enquanto os grãos cizalham sobre eles mesmos preferencialmente, considerando a sua integração. Os problemas da qualidade dos agregados, a necessidade para de correção da análise granulométrica por peneiramento, e da habilidade combinar a fonte com a demanda pode necessitar o uso de uma estratégia de união entre gerador e reutilizador (AFS, 1996).

Então, a produção do asfalto ainda pode beneficiar-se da forma angular do resíduo de areia de fundição sendo necessário combinar as necessidades da indústria do

asfalto com as exigências de destinação dos resíduos das indústrias de fundição (WINKLER, 1999).

Outra característica importante é que o tamanho reduzido contido nos resíduos de areia tem menos sílica que o material original, portanto há um aumento na quantidade de bentonita e carbono. Esta poeira preta fina desenvolve forças adesivas consideráveis nos filtros dos cilindros que misturam o asfalto. Durante um teste em que a areia natural foi substituída 100% pela areia usada os filtros ficaram obstruídos completamente. Os sistemas de quebra foram incapazes retirar a poeira, e como além da poeira, umidade também é liberada das misturas minerais nos cilindros. Isto fez com que o bentonita restante expandisse e ficasse aderida. Estes efeitos naturalmente não ocorrem ao usar misturas minerais normais. Neste caso também, o desenvolvimento da proporção adequada do resíduo de areia na massa asfáltica é uma precaução eficaz e que deve ser considerada (ECKSTEIN, 2001).

Os principais critérios para o reuso de resíduos de areia usada em usinas de asfalto resultam do fato que um material de construção natural com propriedades muito específicas deve ser substituído e que o substituto deve também cumprir estas propriedades. Isto significa particularmente: - presença de nenhum material inconveniente tal como pedaços de ferro, escória, madeira, plástico, etc. - sem torrões de areia ou quebráveis facilmente – ausência de partículas muito finas; - estar ligeiramente úmido para impedir a produção da poeira - ser entregue como o material livre em caminhões abertos ou em container (ECKSTEIN, 2001).

Dentro dos critérios para reuso de resíduos de areia de fundição para uso em pavimentação asfáltica, deve-se considerar todo o protocolo de ensaios relacionados para o uso um material como agregado em misturas de asfalto. Para Feliciano *et al.* (2002), a avaliação da utilização de materiais como escória na pavimentação rodoviária compreende a coleta e o preparo das amostras, incluindo etapas de britagem e peneiramento das frações. Processadas as amostras, as mesmas devem passar por etapas de análise granulométrica, abrasão Los Angeles (para avaliação da resistência) e limites de Atterberg (para avaliar as expansões longitudinais ocorridas). Dentre as especificações para os agregados na construção de rodovias cita ainda: a forma, o conteúdo de umidade, a densidade, a resistência ao desgaste e polimento, a massa específica aparente e real.

Após a realização dos ensaios dos agregados são executados os corpos de prova, em seguida, é executado o Ensaio Marshall que inclui a avaliação dos vazios, a relação entre vazios e betume, a estabilidade e a fluência da mistura.

A mistura asfáltica para capa de rolamento, quando dosada pelo Método Marshall, deve satisfazer as características DNER – ME 43/64: Porcentagem de vazios = 3 a 5 % ; Relação betume/vazios = 75 – 82 %; Estabilidade = 350 a 700 Kgf /500 a 1000 Kgf.

Na realização do ensaio Marshall são determinados os seguintes elementos:

- a) Densidade – deve-se obter através do peso pelo volume.  $D = P/V$  (Kg/Dm<sup>3</sup>);
- b) Estabilidade – é a carga expressa em kg, ou libras, que produz a ruptura diametral do corpo de prova, a temperatura ambiente;
- c) Fluência – é a deformação diametral do corpo de prova, expressa em centésimos de polegadas, medida no momento da ruptura, a temperatura ambiente.

O uso de materiais em usinas de asfalto requer não somente determinadas propriedades físicas, mas também a aprovação das autoridades ambientais em conformidade com a legislação ambiental e federal. Toda usina deve ter este tipo de aprovação que se relaciona à sua localidade e que não pode ser generalizada.

A aplicação de resíduos de fundição é relatada em países como Alemanha, Canadá, Espanha, França e Itália, demonstrado a seguir. No Brasil, esta utilização ainda esta sendo pesquisada para obter o licenciamento desta atividade junto aos órgãos ambientais (BONET, 2002).

Conforme Winkler (1999), no Canadá, esta prática de reutilizar os resíduos de fundição já tem sido feita em Ontário por uma década, e atualmente na Espanha, os resíduos de areia de fundição são fornecidos para a sua utilização como matéria prima nos setores de fabricação de cimento e asfalto (GORBEA, 2001).

Em 1992, nos EUA, muitos departamentos de transporte estariam desencorajando o uso de agregados obtidos de rios em favor de agregados regulares manufaturados, criando uma oportunidade para a introdução dos agregados angulares usados na fundição no mercado de fabricação de asfalto (AFS, 1992).

Na Alemanha, nos anos 80, foram iniciados os testes em laboratório utilizando resíduos de areia de fundição em misturas asfálticas. No início dos anos 90, iniciou a primeira usina de asfalto aprovada para utilizar estes materiais, sendo necessário sua adequação técnica como, por exemplo, a capacidade dos silos e áreas de estocagem para estes materiais.

De acordo com a legislação alemã atual, o asfalto produzido usando uma proporção de resíduo de areia, não pode ser usado em áreas da proteção. Isto deve ser orientado aos compradores de asfalto. Entretanto, geralmente este não é um problema significativo. Na Alemanha há um total de aproximadamente 250 usinas de asfalto, que individualmente produzem em média aprox. 100 - 120.000 toneladas de mistura de asfalto.

Isto resulta em uma quantidade de resíduos de areia em aproximadamente 3.000 a 6.000 toneladas por usina por ano. Se todas as usinas alemãs fossem obrigadas a usar os resíduos de areia, não haveria mais problemas com a disposição deste material (ECKSTEIN, 2001).

Na Espanha, França e Itália, onde a legislação para a atividade de fabricação de asfalto é menos restritiva, a implementação de resíduos de fundição depende, em grande parte, de acordos feitos entre as usinas e o fundidor, pois existem barreiras ambientais governamentais muito baixas. Desta forma a facilidade de reuso de resíduos de fundição está basicamente atrelada aos interesses do mercado de construção civil e de fundição (ECKSTEIN, 2001).

Outro fator a ser considerado na reutilização de resíduos é a distância existente entre o gerador e a usina de asfalto. As distâncias das usinas e os custos do frete não são constantes, considerando que podem ser utilizadas unidades móveis de fabricação de asfalto. Também os preços das matérias-primas e insumos das usinas mudam de localidade para localidade. Se a usina for situada em uma região com fontes baratas da areia natural, os custos da eliminação de resíduos serão mais elevados para o gerador. Nas localidades onde não há muita areia natural disponível para usinas, o resíduo de fundição pode ser um aditivo bem-vindo.

Uma alternativa para pequenas quantidades de resíduos de fundição ou geração por pequenas fundições, é o transporte para uma central de estocagem que receberá os resíduos dos geradores e encaminhará para os usuários (AFS, acesso em: 13/08/2003).

As fundições de médio porte, particularmente, beneficiam-se do emprego do uso de resíduos de areia em usinas de asfalto, porque a quantidade gerada é aproximadamente equivalente à quantidade que pode ser reciclada. Para fundições de grande porte, com mais de 100.000 toneladas de resíduos de areia por ano, esta alternativa de reuso é apropriada como uma solução parcial porque será necessário um maior número de usinas, aumentando cada vez mais as distâncias que terão que ser superadas considerando que os custos envolvidos com a logística do transporte aumentam dramaticamente (ECKSTEIN, 2001).

Algumas vantagens e desvantagens podem ser apontadas nesta alternativa. Os resíduos substituem matérias-primas naturais e, portanto preservam recursos naturais; até o momento este material era disposto em aterro, gerando custos altos para as fundições e aumentando as áreas de aterro; o fornecimento de areia natural pode ser reduzido gerando vantagens econômicas aos fabricantes de asfalto; ao contrário da produção de concreto a cor do resíduo não interfere na cor do asfalto; a possibilidade de contaminação existente no resíduo é ligado na matriz de betume, não sendo lixiviada para o meio; as coberturas

asfálticas são geralmente recicladas, contudo de qualquer forma a areia poderá parar em um aterro mais tarde incorporada na massa asfáltica, sendo esta uma realidade da reciclagem.

A pesquisa no uso da areia de fundição como um agregado fino do concreto betuminoso indica que a substituição parcial do agregado fino é aceitável de 15% a 30% em massa. Alguns agregados finos requerem a secagem antes de ser misturado na mistura do asfalto. O material orgânico contido no resíduo de fundição tende a ser queimado durante este processo de secagem, tendo como resultado um produto mais limpo. Adicionalmente os resíduos também podem impactar emissões atmosféricas nas operações da usina de asfalto (AFS, 1996).

Para CWC (1996), o resíduo de areia de fundição pode substituir o agregado miúdo em 15% no asfalto convencional.

Quando 15 % dos resíduos de areia de fundição estiverem misturados com os agregados convencionais do asfalto, o desempenho da mistura não será muito diferente do usado com somente materiais convencionais. Entretanto, ao usar mais do que 15% de resíduos com os agregados convencionais encontraram-se baixos valores de fluxo e vazios elevados, os quais podem conduzir baixa resistência da mistura e a conseqüentemente rachaduras prematuras. (JAVED *et al.*, 1994).

Apesar das pesquisas já realizadas, tanto no exterior como no Brasil, o emprego de areia usada de fundição em misturas asfálticas (tipo concreto asfáltico ou pré-misturados) se mostrar com ótimos resultados; esta ainda não pode ser usada indiscriminadamente, pois a composição dos resíduos pode variar muito, dependendo do tipo de liga metálica (ferrosa ou não-ferrosa); do tipo de moldagem utilizado e do tipo de ligante utilizado na moldagem. Tudo isso, porque a areia pode conter metais pesados oriundos dos aditivos usados nas ligas fundidas e compostos orgânicos derivados do fenol, que apresentam certa toxicidade. Embora a areia de moldagem seja classificada como resíduo classe II – não inerte – esta exige um cuidado para poder ser utilizada.

O uso da areia em misturas asfálticas, pode ser um uso ambientalmente menos agressivo, até porque as misturas asfálticas convencionais, de aplicação tecnológica consagrada, são constituídas de materiais que apresentam substâncias potencialmente tóxicas. Isto se deve ao fato do cimento asfáltico de petróleo (CAP), ligante da mistura, poder envolver todas as partículas da massa, e assim, evitar o contato da areia com água ou outro solvente, que poderia lixiviar as substâncias tóxicas encontradas na areia (NUNES *et al.*, 2003).

Os trabalhos de Bonet (2003), concluem que a utilização do resíduo de areia de fundição como uma matéria-prima para as empresas de pavimentação asfáltica, pode ser considerado satisfatório, pois atende as especificações de dimensionamento estruturais e legislação ambiental.

### **3.4 Aplicação em Materiais Cerâmicos**

Nos estudos de reutilização e reciclagem de resíduos de fundição, conforme visto na leitura deste capítulo, têm-se encontrado pouquíssimos exemplos de aplicações na fabricação de cerâmica estrutural ou vermelha e na fabricação de materiais vítreos, como as fritas cerâmicas.

Entretanto, considerando seu potencial de aplicabilidade, destacam-se a seguir alguns aspectos da fabricação destes materiais e considerações sobre a reutilização de materiais alternativos na sua composição.

#### **3.4.1 Cerâmica Vermelha**

De acordo com Motta *et al.* (2001), Bustamante & Bressiani (2000), o segmento de cerâmica estrutural caracteriza-se pela cor vermelha de seus produtos, o qual produz tijolos, blocos de vedação e estruturais, telhas, manilhas, tubos, lajes para forro, lajotas, vasos ornamentais, agregados leve de argila expandida pisos rústicos e outros, originando o nome popular de cerâmica vermelha.

Na cerâmica tradicional as matérias-primas estratégicas são as argilas, que desempenham papel fundamental na aglutinação e processamento a verde, assim como são agentes de sinterização responsáveis pelo desenvolvimento, após a queima, de resistência mecânica e das fases estáveis nas condições de uso (ALVES & BALDO, 1997).

Os materiais cerâmicos são fabricados a partir de matérias-primas classificadas como naturais e sintéticas. Dentre as naturais mais utilizadas para a produção de cerâmica estrutural, destacam-se as argilas. Outros insumos são utilizados para compor a matéria-prima principal e auxiliar no processo de queima, servindo também para acrescentar algumas características específicas de cada produto.

A preparação da massa é feita geralmente através da mistura de alta plasticidade, granulometria fina, e composição essencialmente de argilominerais; com uma

argila menos plástica, esta rica em quartzo, podendo ser caracterizada também como material redutor de plasticidade. Adicionalmente à composição granulométrica, que reflete o conteúdo de argilominerais, as argilas contêm também proporções variadas de matéria orgânica, material que contribui para maior plasticidade e resistência mecânica a cru das peças (MOTTA *et al.*, 2001).

Para Feliciano *et al.* (2002) e Montedo *et al.* (2003), diferente de outros setores produtivos, o setor cerâmico utiliza, basicamente, matérias-primas naturais. As argilas são constituídas, principalmente, por partículas cristalinas extremamente pequenas de minerais conhecidos como argilominerais. Assim, as matérias-primas da indústria cerâmica vermelha são compostas, basicamente, de óxidos de alumínio, silício, ferro, sódio, magnésio, cálcio, dentre outros. Além dos argilominerais, a argila contém outros materiais e minerais, tais como matéria orgânica, sais solúveis e partículas de quartzo, pirita, mica, dolomita e outros minerais residuais, podendo conter também minerais não cristalinos ou amorfos.

As argilas utilizadas para tijolos originam-se dos rios, lagos ou várzeas, sendo ricas em ferro e álcalis e com teor apreciável de matéria orgânica, fator responsável pela sua plasticidade (FELICIANO *et al.*, 2002).

Dos estudos de Pracidelli & Melchiades (1997), verifica-se que a produção de tijolos e telhas depende muito das características de suas matérias-primas; daí a extrema importância das provas experimentais efetuadas sobre as mesmas. Sabe-se que as argilas são compostas de material argiloso e material não plástico.

Sabe-se também que quando se mistura uma argila com certa quantidade de água, obtém-se uma massa coesiva que pode ser moldada com facilidade e ser deformada sem ruptura pela ação de uma força e de retendo, posteriormente, a deformação alcançada quando esta força é eliminada. A esta capacidade denomina-se plasticidade.

Os materiais não plásticos, representados essencialmente por areias, micas, óxido de ferro e outros, atuam como agentes desplastificantes nas composições. Os estudos dos materiais plásticos e não plásticos levam à economia de matéria prima, evitando desperdícios, com redução dos custos e melhoria da qualidade do produto final.

A adição de materiais não plásticos nas argilas reduz a sua interação com a água, causando pontos de descontinuidade nas forças de coesão entre as partículas, tanto no sentido horizontal, como no vertical. Os pontos de descontinuidade produzem poros, que permitem a passagem de água do interior até a superfície da peça.

Quando se realiza a adição de materiais não plásticos nas massas de cerâmica vermelha, a plasticidade da mistura é reduzida. Como a composição torna-se menos plástica, a resistência ao fluxo imposta pela mesma torna-se maior, fazendo com que seja



necessário o emprego de maiores pressões para a extrusão. O aumento da pressão de extrusão não é uma alternativa aconselhável, pois a extrusora fica submetida a esforços maiores e sua vida útil pode ser reduzida. Para evitar o problema torna-se necessário aumentar a quantidade de água da mistura, possibilitando o emprego de pressões mais baixas na extrusão. Apesar do aumento no teor de umidade da massa o processo de secagem pode ser realizado com facilidade, pois a massa se torna menos compacta. Então, a quantidade de água a ser introduzida na mistura deve ser determinada convenientemente, a fim de se facilitar o processo de extrusão, evitando danos na extrusora.

Para a conformação da massa, as cerâmicas locais normalmente utilizam excessiva quantidade de água, normalmente superior a 30% em peso de material seco, que acarreta em grande dificuldade de secagem. Além disso, após queima, os produtos apresentam elevada porosidade que acarreta em valores de absorção de água superior a 18%, associados à elevada retração linear (VIEIRA *et al.*, 2004).

As principais etapas do processamento de materiais cerâmicos incluem, de forma geração, a preparação de matéria-prima, a moldagem ou conformação das peças, a secagem e queima. A Figura 3.1 apresenta um fluxograma típico dos processos de fabricação de blocos e telhas.

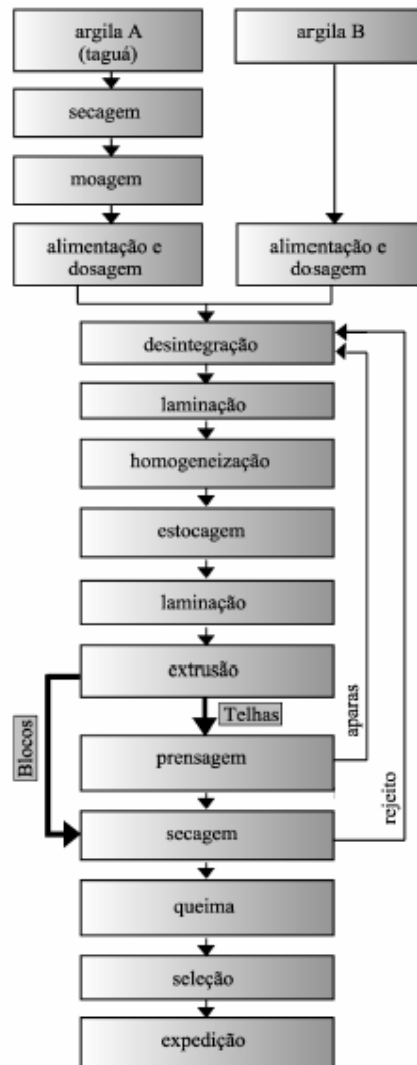


Figura 3.1 Fluxograma dos processos de Fabricação de Blocos e Telhas.

Fonte Cerâmica: Manual de conhecimentos (1992)

Conforme Bastos (2003), no Brasil a extração de argila é realizada a céu aberto e geralmente as empresas possuem suas próprias jazidas. Em algumas regiões são formadas cooperativas entre as empresas para realizar a extração, o que geralmente traz uma diminuição do custo da matéria-prima.

A extração é feita através de retro escavadeiras e escavadeiras e o transporte da jazida para a fábrica é realizado através de caminhões basculantes. O plano de extração normalmente prevê a remoção de estéreis, isto é, a vegetação, o solo arável e outros

materiais maléficos ao processo. Os diferentes tipos de argila são separados em pilhas em função de suas características, como a plasticidade.

A extrusão consiste em forçar passar a massa, sob pressão, através de um bocal apropriado. Na extrusão é obtida a conformação de peças em uma seção constante. Para ser extrudada a massa deve conter um percentual de água adequado para obter um produto de formas bem determinadas e constantes. Na saída da extrusora está localizada a mesa de corte. A extrusora ou maromba possui ainda dispositivo propulsor, boquilha e dispositivo cortante.

A fase de secagem tem como função reduzir o conteúdo de água adicionada para a conformação, de modo que a queima do material possa ser realizada em tempos industrialmente aceitáveis e aumentar a resistência mecânica a verde do material.

A secagem é uma etapa bastante delicada e complexa no processo de fabricação de cerâmica vermelha. É comum nesta etapa ocorrerem defeitos de secagem nas peças e que são perceptíveis somente após queima. A compreensão dos mecanismos envolvidos na secagem permite, por exemplo, uma melhor compreensão dos defeitos e da forma de como evitá-los (VIEIRA *et al.*, 2003).

A queima consiste em submeter às peças conformadas e secas a uma dada temperatura para que elas adquiram as propriedades desejadas, dentro de valores especificados. Na cerâmica vermelha os produtos são queimados em fornos a uma temperatura entre 850 e 1050 °C.

O processo de queima pode ser executado em fornos intermitentes ou contínuos. O forno intermitente de câmara Hoffmann ou mufla é o mais antigo tipo de forno, com processo de queima consistindo em: carga manual, aquecimento até uma determinada temperatura, patamar na temperatura máxima desejada e resfriamento. O forno tipo túnel ou contínuo é utilizado pelas indústrias de cerâmica vermelha na produção de telhas, manilhas e tijolos. São constituídos por um túnel onde a zona de queima é fixa e o material, carregado em vagonetas, percorre a sua extensão.

Conforme Bustamante & Bressiani (2000), a indústria cerâmica brasileira tem grande importância para o país, tendo participação no PIB – Produto Interno Bruto – da ordem de 1,0%. Distribui-se por todo país, muito pulverizada, em micro e pequenas empresas, quase sempre de organização simples e familiar.

Levantamentos mostram que existem 11.000 unidades produtivas, em uma média de a 30 empregados, somando entre 250.000 a 300.000 empregos. Movimenta ao redor de 60.000.000 de toneladas de matérias primas ao ano, com reflexos nas vias de transportes, e no meio ambiente de lavra de argila. Seu raio médio de ação quanto ao envio

dos produtos está no 250 km, a partir do qual o transporte inviabiliza. Para as telhas o alcance é maior podendo estar-nos 500 km havendo casos de 700 km para telhas especiais. Calcula-se que o valor da produção anual pode estar ao redor de US\$ 2 500 bilhões, conforme apontado na Figura 3.2. Essa renda fica nos locais de produção, com alto significado social na criação de emprego ao propiciar a construção em geral principalmente moradias (BUSTAMANTE & BRESSIANI, 2000).

Produção Brasileira	60.000.000 t
Valor da Produção	US\$ 2.500.000.000
Número de Empregos	300.000
Exportação	Próximo a fronteiras

Figura 3.2 Panorama da Indústria de Cerâmica Vermelha.

Fonte: BUSTAMANTE & BRESSIANI (2000)

Para suprir o segmento de matérias-primas, uma das áreas de maior absorção de materiais reaproveitados de descartes da produção industrial é a área cerâmica, principalmente na fabricação de tijolos e argamassas para a construção civil. Todavia, estudos como estes envolvem aprimoramento da tecnologia de materiais, pesquisa de ponta e muita dedicação para que se obtenha resultados positivos, como a descoberta de novos materiais de melhor qualidade e de custos mais baixos, tendo como maior beneficiária a natureza (BITENCOURT & GEMELLI, 2002).

Aliando os conhecimentos de plasticidade dos materiais e quantidade de umidade utilizada no processo de fabricação de cerâmica vermelha com a necessidade de aprimoramento e maior competitividade, este segmento pode beneficiar-se do uso de resíduos de areia de fundição como material desplastificante, desenvolvendo desta forma novos conceitos de produção, mais sustentáveis, menos impactantes e mais econômicos.

Além disso, como aponta Modesto *et al.* (2003), a preocupação ambiental permeia hoje a função de todos os executivos e gestores da indústria cerâmica, principalmente aqueles que lideram empresas que são grandes utilizadoras de recursos ambientais e ostulantes ao fortalecimento da imagem de suas respectivas empresas, perante seus clientes e toda sociedade. Convém recordar que a fabricação de produtos pela utilização parcial ou total de rejeitos é uma prática comum em países como os Estados Unidos, Itália, Japão e Alemanha. Além disso, fabricar produtos a partir de rejeitos é uma

vantagem que coloca o fabricante em uma posição fortemente competitiva no mercado, devido à questão econômica envolvida e à oportunidade de veiculação deste princípio como marketing, principalmente no aspecto ecológico.

Nessa perspectiva, a incorporação de resíduos indústrias em produtos cerâmicos, ou de outro tipo, pode tornar-se uma das soluções mais interessantes quer do ponto de vista ambiental (não utilização de aterros, redução do uso de recursos naturais, etc.), quer do ponto de vista econômico (na redução dos custos globais da matéria prima, custos de transporte e de deposição em aterro, etc.). Uma vantagem adicional deste tipo de incorporação na cerâmica é ser este um método que assegura a inertização de elementos potencialmente tóxicos, uma vez que existe a sua reação com a matriz cerâmica a alta temperatura (COSTA *et al.*, 2002).

De um modo geral, pode-se afirmar que existem alguns requisitos que podem revelar-se importantes para a incorporação de um resíduo na indústria cerâmica: armazenamento seletivo e temporário, mistura de diferentes lotes e pré-tratamento (COSTA *et al.*, 2002).

Por outro lado, a reutilização de um resíduo torna imprescindível a sua adequada caracterização, a qual envolve, na maior parte dos casos, o conhecimento sobre a composição química e mineralógica, o comportamento térmico, a distribuição de tamanho das partículas e a toxicidade (ensaios de lixiviação). Enquanto que a avaliação do produto obtido deve incluir, além da toxicidade, a avaliação das propriedades de resistência do material, retração e absorção d'água.

A Figura 3.3 sintetiza esquematicamente as etapas mais importantes a considerar quando se pretende transformar uma nova matéria-prima a partir de um resíduo, tentando encontrar uma solução final que aponte para a sua incorporação numa matriz cerâmica, ou mesmo a obtenção de novos produtos e/ou novas aplicações (COSTA *et al.*, 2002).

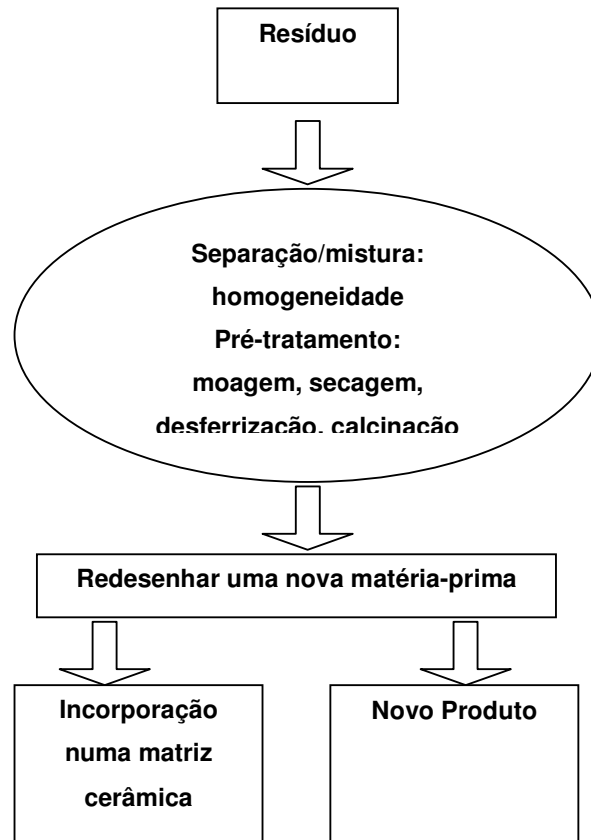


Figura 3.3 Representação Esquemática da Reutilização de um Resíduo Industrial.

Fonte: COSTA *et al.* (2002)

Assim, a exemplificação de alguns casos de reuso pode ser dada como nos estudos realizados com o pó do coletor da indústria siderúrgica que concluíram que os impactos ambientais decorrentes da sua utilização na indústria cerâmica vermelha são desprezíveis e que, portanto, a aplicação desse resíduo neste setor seria uma alternativa viável (FELICIANO *et al.*, 2002).

Em outro exemplo, das pesquisas de Montedo *et al.* (2003), os resultados indicaram que a adição de pó de aciaria à massa de produtos de cerâmica vermelha esmaltada pode ser uma alternativa econômica interessante e ecologicamente correta, se forem tomadas as devidas precauções com respeito ao transporte, armazenamento e manuseio do mesmo, já que torna inerte certas substâncias tóxicas presentes na composição do resíduo.

Exemplos da aplicação de resíduos de areia de fundição podem ser encontrados nos trabalhos de Biolo (2003), da AFS, American Foundrymen's Society (1996) e do Indiana Department of Environmental Management - IDEM (1998). Para Biolo (2001), o emprego da areia de fundição como constituinte da massa dos tijolos é uma alternativa promissora, pois o tratamento térmico empregado é capaz de mineralizar os compostos fenólicos e imobilizar os metais pesados presentes na areia. Nestes estudos, a inclusão dos resíduos de areia de fundição em matrizes de cerâmica vermelha demonstrou-se eficaz, sob o ponto de vista qualitativo no tocante às questões estruturais e ambientais atendendo as exigências de resistência, absorção d'água e da lixiviação de componentes para o meio pois para a temperatura atingida na queima (900° C), o processo de fabricação dos blocos cerâmicos funcionou como os mesmos princípios do processo regeneração de areia através de calcinação, transformando poluentes potenciais em substâncias menos poluentes.

### **3.4.2 Fritas Cerâmicas**

A indústria de revestimentos cerâmicos experimentou uma profunda transformação tecnológica durante os últimos trinta anos, tanto no que se refere ao processo de fabricação, como nas características do produto acabado. Porém, muitos destes avanços, como a implantação da monoqueima, inicialmente na produção de azulejos, além da progressiva redução do ciclo de queima, não teriam ocorrido se não tivessem sido desenvolvidos esmaltes apropriados (ALBARO, 2001).

Para conseguir estes objetivos foi necessário desenvolver novas fritas e esmaltes, melhorar seu processo de fabricação, incorporar novas técnicas e equipamentos à linha de esmaltação e estabelecer sistemas de controle cada vez mais rigorosos, tanto no que se refere as matérias primas como ao processo de fabricação (ALBARO, 2001).

As fritas são materiais de natureza vítrea preparadas por fusão, em temperaturas elevadas (em torno de 1500 °C), a partir de uma mistura de matérias primas, geralmente SiO<sub>2</sub> e outros óxidos tais como: Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, CaO, ZnO, ZrO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, TiO<sub>2</sub>. Estas, durante o processo de fabricação, formam uma massa fundida que, ao final, são resfriadas instantaneamente em ar ou água, originando a frita propriamente dita (SÁNCHEZ, 1997).

São fabricadas através da fusão, em fornos contínuos ou rotativos, e resfriados em água formando um tipo de vidro com propriedade e características constantes. Com tal procedimento, elimina-se a toxidade de alguns esmaltes crus como compostos de chumbo, que são extremamente tóxicos (PORTO ROSSI, acesso em: 10/02/2003).

As principais características a serem consideradas na formulação de uma frita são a viscosidade, a composição química (sílica e outros óxidos presentes) a disposição de tamanho de partículas (DTP), a fluidez ou coesividade e a resistência. Estas qualidades são verificadas através de análise térmica e dilatométrica e também através de padrões visuais da aplicação de uma frita como esmalte em uma peça cerâmica. As fritas são divididas em três tipos: a frita opaca branca, a frita transparente e a frita mate.

O setor de fritas, vidrados, pigmentos e corantes é muito afetado pela moda internacional, que o leva multiplicar seus produtos a um numero surpreendente alto. Uma empresa apenas, por exemplo, informa ter um leque de 2400 produtos, muitos dos quais desenvolvidos por encomendas de indústrias cerâmicas, principalmente exportadoras. As matérias primas estratégicas, utilizadas em todos os produtos, tipo cobalto e zirconia, em falta no mundo, tem elevação de preços por parte de quem controla o mercado (ANUÁRIO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 1989).

O rápido e continuado crescimento do setor de fritas na década de 90 despertou o interesse da comunidade afim, que reuniu o setor produtivo, as universidades e outras instituições de pesquisa para diagnosticar os problemas e propor ações de melhoria da qualidade no setor, integrando toda a sua cadeia produtiva. As matérias primas foram apontadas como um dos pontos dessa cadeia que precisa de maior aporte de ações para garantir a qualidade, conforme destacado pelos grupos de trabalho de Mineração e Matérias Primas, de Desenvolvimento de Massas e Produtos Cerâmicos e de avaliação Ambiental do Projeto Plataforma para a indústria de Revestimento (MOTTA *et al.*, 2001).

Para Heras (2002), de todos estes aspectos, a qualidade, o serviço e a inovação continuam sendo fundamentais no desenvolvimento de uma empresa que busca uma posição de liderança no mercado. Portanto, a mudança e a contínua melhora é uma realidade nas empresas de fritas, esmaltes e corantes, as quais entendem que o termo qualidade deve ser aplicado e todas as atividades da empresa, não somente àquelas que estão diretamente ligadas ao processo produtivo e aos produtos comercializados, mas também a outros aspectos, como a relação com o cliente, a organização, os recursos humanos, a inovação tecnológica, a gestão ambiental, segurança e proteção da saúde dos empregados e o compromisso com a sociedade.

De acordo com Sanches (1997), a palavra chave na próxima década será competitividade, é assegurar relação qualidade/preço dando especial importância neste aspecto, às fritas, matérias primas semi elaboradas, nas quais a repercussão dos custos das matérias primas de partida é o principal condicionante do custo de fabricação.



Para entender plenamente a todos esses segmentos industriais é colocado um desafio ao setor de mineração, que é ofertar minérios padronizados, a custos baixos, para garantir a competitividade e economicamente atender as exigências ambientais cada vez mais rígidas. Quanto à questão ambiental, sobretudo em áreas de alta competitividade entre a mineração e outras formas de uso e ocupação do solo, torna-se necessária a adoção de políticas públicas, como a elaboração de planos diretores de mineração, que estabeleçam área e parâmetros de funcionamento da atividade ordenada, para garantir o abastecimento de matéria primas. Do ponto de vista do aperfeiçoamento tecnológicos no sistema produtivo de matérias primas, é importante que o setor compartilhe o desafio com laboratórios e equipes de universidade e institutos de pesquisa, tendo em vista que a indústria mineral é constituída principalmente de pequenas e médias empresas, que nem sempre dispõe de capital e equipe técnica suficiente (MOTTA *et al.*, 2001).

O panorama que será enfrentado conjuntamente as empresas fornecedoras de matérias primas e as fabricantes de fritas e esmaltes cerâmicos incluirá: a melhoria da qualidade das matérias primas e a busca de alternativas para matérias primas atualmente estratégias e cujo preço vem praticamente definido por motivos puramente especulativos e a diminuição do impacto sobre o meio ambiente, adotando as medidas preventivas como a substituição de matérias primas ou design que considere aspecto ambiental como critério na formulação ou adotando medidas corretivas como a instalação de sistemas de depuração de emissões gasosas, efluentes líquidos ou resíduos sólidos (SÁNCHEZ, 1997).

### **3.5 Outras Aplicações**

Além das possibilidades de reciclagem interna como a regeneração e a recuperação de areias de fundição, e das possibilidades de reutilização como na pavimentação asfáltica, em aterros e na fabricação de cerâmica ou fritas cerâmicas, o Departamento de Gerenciamento Ambiental de Indianópolis (IDEM, 1998), por exemplo, indica que os resíduos de fundição podem ser utilizados como matéria-prima para: material de enchimento da construção civil; fabricação de concreto, blocos, cimento Portland, vidro, lâ de rocha ou minerais, polímeros, tintas, argamassa; como agregados leves e produtos similares.

#### Material de Enchimento:

A areia de fundição pode ser utilizada como material de enchimento na substituição de areia natural. O produto é feito tipicamente da mistura da areia, de cimento

de portland, de cinzas, e de água. As misturas variam dependendo do uso pretendido. O material de enchimento é uma mistura compactante e niveladora que desenvolve forças, similares ao concreto, e é usada geralmente como preenchimento de trincheiras, comumente chamada de “cama de assentamento” em canalizações de esgoto ou canalizações em geral, terraplanagem, bases ou sub-bases para estradas, escavações, fundos de tanques de estocagem, elevatórias, e em demais utilidades da construção civil (CWC, 1996; REGAN *et al.*, 1997; VIPULANANDAN *et al.*, acesso em: 09/02/2004 e 20/02/2004; WALDEN, 2001).

Ao contrário de outras aplicações o resíduo de fundição pode ser usado como um substituinte na proporção de 1:1 da areia virgem ou natural em materiais de enchimento na construção civil. A aceitação do resíduo somente será de interesse do setor de construção civil quando o resíduo apresentar-se como um material uniforme. Para atender a estes interesses, as fundições selecionam o resíduo para remover torrões e impurezas e conforme necessário, estocam o material até que o volume suficiente esteja disponível para uma fonte ininterrupta de reuso (MOSHER, 2001).

A aplicação de areia de fundição como material de enchimento é intermediária entre as aplicações geotécnicas e a aplicação em cimento portland por ser uma mistura de baixa resistência (AFS, 1996).

#### Fabricação de Cimento Portland:

Em 1992 a AFS, American Foundrymen's Society, já descrevia a aplicação de resíduos de fundição na fabricação do cimento Portland como uma alternativa viável desde que a geração fosse compatível com o consumo dos fabricantes de cimento, considerando o manejo necessário para a reutilização do resíduo e assim poder valorizá-lo.

Assim, a AFS (1996), através de relatório, novamente afirma que resíduo de areia de fundição é um possível substituto da areia virgem ou natural usada na produção do cimento portland. Neste processo de fabricação as fontes de materiais a base de calcário são queimadas em alta temperatura juntamente com a sílica, produzindo o clínquer, resultando silicatos de cálcio que são a base da produção do cimento portland. As extremas temperaturas utilizadas nos fornos de cimento fazem com que o material orgânico aderido no resíduo de fundição entre em combustão. Esta é uma vantagem para fornecer areia de fundição, pois a mesma é efetivamente tratada pela remoção dos materiais orgânicos.

Para o reuso, os fabricantes de cimento requerem que a areia seja uniforme, livre de excessos de cavacos de metal e baixas concentrações de metais pesados. O resíduo de areia de fundição geralmente atende estas condições. As fábricas de cimento

requerem quantidades elevadas de sílica (cerca de 50.000 toneladas anualmente), e por causa das diferenças nas exigências de fabricação de seus produtos pagam geralmente muito menos por sua fonte de areia do que as fundições. A praticabilidade desta alternativa de reuso vem frequentemente da distância e dos custos de transporte. Comparado com outros potenciais usuários de resíduo de fundição existe um número relativamente pequeno de fabricantes de cimento, assim a maioria das fundições estará a uma longa distância da cimenteira mais próxima (REGAN *et al.*, 1997).

Um estudo da AFS indica que o cimento de portland produzido com a até 13% de areia de fundição demonstrou resistência à compressão ligeiramente maior do que o cimento portland convencionalmente produzido, sem nenhuma degradação das características principais tais como o tempo de cura (CWC, 1996).

#### Cimento e Artefatos:

Conforme relata Walden (2001), a areia de fundição tem sido utilizada na fabricação de cimento Portland, como concreto ou artefatos na produção de tijolos, blocos, pavimentos, tubulações, etc. O concreto consiste numa mistura de 30% de areia, 50 % de brita, 15% de cimento e 55% de água. O concreto pode ser moldado no local, ou pré-moldado para produtos como tijolos, tubos ou bloco.

Nos estudos de Watanabe *et al.* (2002), para a utilização de areia de fundição como agregado na confecção de pavimentos de concreto, ou para qualquer outro artefato, encontrou-se o valor de substituição da areia natural por até 25% de areia de fundição sem nenhum beneficiamento.

Além da pesquisa de Watanabe, nos trabalhos de Pereira *et al.* (2000), é comprovada a possibilidade do uso de resíduos de areia verde de fundição como substituto da areia normal em artefatos de concreto e como agregado fino na produção de argamassa para construção civil, devido às suas características assemelharem-se com o agregado de areia virgem ou natural.

Adicionalmente, os resultados da pesquisa de Bodet (1999) indicam que os blocos de concreto feitos com 10% de resíduo de areia de fundição atenderam aos padrões franceses e que não apresentaram problemas durante a mistura e moldagem.

#### Lã de Rocha:

Lã de rocha, fibra de vidro ou escória de lã são produtos minerais que usam fontes de sílica na sua produção que são usados para reforçar outros materiais.

Sua aplicação encontra-se na fabricação de materiais de construção, em isolamento e em agricultura. As fibras são produzidas através de combinação de escória de alto-forno ou basalto (rocha ígnea) com sílica e alumina em um forno cubilô tornando o material fundido em fibroso.

Desta forma o resíduo de fundição, em função das suas características, pode servir como fonte de sílica para este processo (AFS, 1992; CWC, 1996). Entretanto, pode ser necessário algum pré tratamento, considerando que a forma em que o material é fornecido é uma característica crítica do processo (AFS, 1996).

#### Fabricação de Composto ou Adubo:

Compostagem é a transformação do material orgânico (plantas) através da decomposição em solo similar chamado composto. Os invertebrados (insetos e minhocas) e os micro-organismos (as bactérias e os fungos) ajudam a transformar o material no composto. A compostagem é uma forma natural de reciclagem, que ocorre continuamente na natureza. A areia natural é necessária como um material de preenchimento nas leiras para o composto orgânico. A areia natural ajuda também na aeração da leira. Uma decomposição eficiente somente pode ocorrer se uma quantidade suficiente de oxigênio estiver presente (ORKAS, 2001).

Assim, a areia de fundição pode ser utilizada na agricultura na correção de solos participando do processo como um material de preenchimento nos terrenos ou leiras de compostagem para produzir solo superficial ou aditivos (adubo) (CWC, 1996). Um importante fator nesta reutilização é devido a presença da argila na areia de fundição, pois esta aumenta a capacidade do solo em reter nutrientes e água (WALDEN, 2001).

Nos estudos de Regan *et al.* (1997), o resíduo de areia de fundição está sendo usado com sucesso no solo em concentrações elevadas como com até 50% de incorporação no composto. Já nos estudos de Orkas (2001), foram testados 20 % de areia de fundição em conjunto com 50% de resíduo biológico ou orgânico e 30% de resíduo da indústria de papel. Os resultados desta pesquisa concluíram que o resíduo de areia de fundição pode ser usado no preenchimento das leiras de compostagem. Gorbea (2001) comenta ainda que na Catalunia, Espanha, também estão sendo desenvolvidos trabalhos com a incorporação de resíduos em processos de gestão que contemplam a reciclagem agrícola através da compostagem.

Os avanços no uso do resíduo de fundição na correção do solo são cautelosos devido à necessidade demonstrar um baixo risco de exposição na cadeia alimentar ou ingestão direta. A chave para a aceitação do resíduo de fundição como um corretor do solo

em escala nacional, nos Estados Unidos, é dependente do Departamento Americano de Agricultura (USDA) e do Serviço de Pesquisa em Agricultura. Por parte destas organizações existe o interesse em desenvolver uma pesquisa nacional para o uso do resíduo em aplicações na agricultura e horticultura (MOSHER, 2001).

### **3.5.1 Conclusões**

Avaliando o Ciclo de Vida da Areia de Fundição e a Valorização de Areias de Fundição, verificou-se que dentre os tipos de resíduos de areia gerados no processo produtivo é importante selecionar as areias de moldagem (areia verde) das de macharia (fenólicas), pois estas possuem impactos ambientais e medidas de controle diferenciadas.

As areias de macharia, por conterem ligantes orgânicos tóxicos têm probabilidade superior de contaminação perante as areias de moldagem, visto que, estas últimas são formuladas a partir de compostos não tóxicos e não são esperados impactos ambientais significativos decorrentes da sua toxicidade.

Os processos de regeneração, aplicados às areias fenólicas, são suficientes para controlar seus impactos ambientais, porque podem, através de calcinação, eliminar os compostos orgânicos e devolver praticamente todo resíduo ao processo produtivo. Já os processos de recuperação, aplicados às areias de moldagem, conseguem devolver apenas parte do resíduo como matéria-prima para o processo produtivo de fundição.

Em função destes fatores, os maiores impactos ambientais ficam por conta das areias de moldagem devido ao consumo de recursos naturais, mesmo que reduzido pela recuperação, e pela necessidade de áreas para disposição dos seus excedentes.

No entanto, visto que é possível valorizar os excedentes de areia de moldagem, através dos processos de reuso apresentados, tais como: uso em aterros, fabricação de asfalto, cerâmica vermelha e na construção civil, ainda é possível reduzir estes impactos. Para isto é necessário desenvolver pesquisas, especialmente a nível brasileiro, buscando fomentar estas tecnologias de reuso junto a fundições, associações ou instituições de pesquisa.

A união destas informações resultou na execução do próximo capítulo, no qual é apresentada a aplicação de três protocolos para avaliar a condição de uso de resíduos de fundição: em massa asfáltica, cerâmica vermelha e fritas cerâmicas. Utilizaram-se como amostras as areias de moldagem existentes no processo de fundição: areia do sistema de preparo da mistura de moldagem (A), areia da quebra de canais (B) e pó da exaustão do

sistema de preparo da mistura de areia (C). Posteriormente aos procedimentos experimentais são apresentados os resultados desta aplicação na busca da avaliação destes resíduos como matéria prima dentro das atividades testadas.

## **4. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS**

### ***4.1 Caracterização da Produção de Resíduos de Fundição***

Para subsidiar a pesquisa de Aplicação de Resíduos de Fundição em Massa Asfáltica, Cerâmica Vermelha e Fritas Cerâmicas, foram coletados dados da Empresa Schulz S.A., com o objetivo de caracterizar a produção de resíduos em Fundição de Ferro. Os dados foram coletados a partir de processos instalados, monitoramento realizado e disposição aplicada para os resíduos.

Os dados fornecem as seguintes informações:

- a) Quantidade Produzida, fundidos no ano de 2003;
- a) Tipos de Resíduos de Fundição,
- b) Quantidades Geradas de resíduos de fundição, no ano de 2003;
- c) Fluxograma da Geração de Resíduos
- d) Classificação dos Resíduos, conforme NBR 10.004;
- e) Tratamento;
- f) Disposição;
- g) Controle.

### ***4.2 Caracterização dos Resíduos***

A maior geração de resíduos em um processo de fundição está localizada nos setores ligados à moldagem, verificada através das seções 4.1 e 5.1 Caracterização da Produção de Resíduos de Fundição.

As areias residuárias, são originárias mais precisamente do sistema de preparo de areia para moldagem (Areia A), da quebra de canais (Areia B) e da exaustão do sistema de preparo de areia (Areia C), conforme fluxograma apontado na seção 5.1 Caracterização da Produção de Resíduos de Fundição.

Os resíduos selecionados foram caracterizados no laboratório do Centro de Tecnologia em Materiais (CTMat/SENAI) em Criciúma e no laboratório Acquaplant, localizado em Joinville conforme fluxograma abaixo:

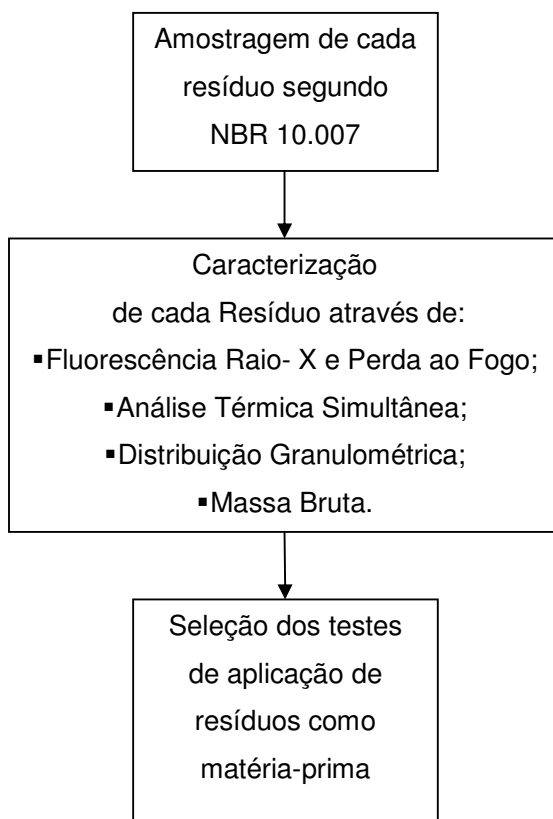


Figura 4.1 Fluxograma da Caracterização de Resíduos de Fundição.

#### 4.2.1 Amostragem para Caracterização

Considerando que a geração de resíduos é contínua e homogênea foi possível proceder à coleta instantânea aplicando-se a norma NBR. 10.007 para amostragem de resíduos. O estudo foi composto de uma amostragem, na qual coletaram-se quantidades suficientes das amostras para a execução dos ensaios. Para os ensaios posteriores de aplicação dos resíduos em massa asfáltica, cerâmica vermelha e fritas cerâmicas, efetuou-se nova amostragem utilizando-se a mesma metodologia.

Dados da Coleta:

Data da Coleta: 18/03/03



Condições do tempo – dia de sol com algumas nuvens; umidade: 62%; temperatura: 25°C; ventos nordeste: 10 km/h (fonte: weather channel/climatempo)

Horário da Coleta: 9:30 – 10:30

#### Amostra 1: Areia do Sistema (Areia A)

A areia do sistema é proveniente do descarte na esteira, em virtude da necessidade de adicionar areia nova para manter as propriedades da mistura para o vazamento do ferro líquido.

A amostra foi coletada diretamente da caçamba que recebe descarte contínuo da esteira. A coleta foi efetuada utilizando-se de pá, retirando porções da superfície, do centro do material e das laterais. Foram retiradas pequenas impurezas como papel e palha de vassoura.

O resíduo foi acondicionado embalagem adequada para amostragem e colocado posteriormente em caixa de papelão para o transporte até os laboratórios para a execução da caracterização.

A amostra foi pesada em balança com precisão decimal e identificada por etiqueta padrão para descarte de resíduos. Massa da amostra: 10, 4 kg

#### Amostra 2: Areia da Quebra de Canais (Areia B)

A areia da amostra 2 é gerada no setor de acabamento onde ocorrem os processos de retirada de canais de vazamento e massalotes. Nesta etapa a peça ainda possui areia proveniente das caixas de moldar após a operação de desmoldagem. Esse material é separado em caixas, no chão onde são acondicionadas peças maiores ou através de esteira.

A amostra foi coletada através de pá no local de geração, constituída por porções provenientes das caixas de acondicionamento, da esteira e do chão. Tomou-se o cuidado de peneirar a amostra de modo a evitar a presença de retalhos de ferro no resíduo.

O resíduo foi acondicionado embalagem adequada para amostragem e colocado posteriormente em caixa de papelão para o transporte até os laboratórios para caracterização.

A amostra foi pesada em balança e identificada por etiqueta padrão para descarte de resíduos. Massa da amostra: 14,0 kg

### Amostra 3: Pó da Exaustão do Sistema de Areia (Areia C)

O pó da exaustão é oriundo do descarte do sistema de filtros manga que coleta o particulado fino do sistema de preparo e abastecimento de areia para a moldagem.

A amostra foi coletada diretamente da caçamba que recebe o descarte contínuo da exaustão do sistema de areia.

A coleta foi efetuada utilizando-se de pá, retirando porções da superfície e do centro do material. Não foi possível coletar de todas as laterais devido ao sistema de fechamento da caçamba.

O resíduo foi acondicionado embalagem adequada para amostragem e colocado posteriormente em caixa de papelão para o transporte até os laboratórios para caracterização.

A amostra foi pesada em balança e identificada por etiqueta padrão para descarte de resíduos.

Massa da amostra: 12,0 kg

### **4.2.2 Análise Química por Fluorescência de Raios-x**

A análise química por fluorescência de raios-X teve por objetivo conhecer a composição química das amostras de resíduos das areias estudadas em termos de óxidos presentes.

As amostras dos resíduos de areia A, B e C foram homogeneizadas e quarteadas para retirada de uma alíquota para ensaio.

Para o ensaio foi necessário Espectrômetro de Fluorescência Raio-X, Balança de precisão, almofariz, fundente e oxidante e cadinhos.

Para o ensaio de perda ao fogo, complementar ao ensaio de fluorescência na determinação da presença de material volátil, as amostras foram previamente pesadas e depois calcinadas à 1000° C durante 01 (uma hora) anotando-se após o ensaio seu peso e efetuando-se os cálculos necessários.

### **4.2.3 Análise Térmica Simultânea (Diferencial e Termo-Gravimétrica)**

O objetivo da análise térmica simultânea foi observar as variações de massa que ocorrem no aquecimento das amostras e na aplicação de calor a reações exotérmicas ou endotérmicas.

Para a execução dos ensaios foi necessário: Analisador Térmico Simultâneo; Balança com precisão de 0,0001 g; Cadinhos de alumina; Dessecador; Pinça; Porta cadinhos.

Os resultados obtidos são os valores de temperatura e/ou perda de massa que estiverem impressos no gráfico, além das curvas de análise térmica diferencial e termogravimétrica, bem como suas curvas derivadas.

#### 4.2.4 Distribuição Granulométrica

O objetivo de ensaio de distribuição granulométrica via peneiramento a seco foi determinar a dimensão das partículas presentes na amostra.

Para o ensaio foram necessários: recipiente metálico (bacia); recipiente com capacidade de 2l; agitador mecânico; balança com capacidade de operação de 2000 g com resolução de 0,01 g; vibrador de peneiras; peneiras; fundo para peneiras; pissete.

Utilizou-se o seguinte jogo de peneiras:

- malha 16 mesh (1000µm);
- malha 32 mesh (500µm);
- malha 60 mesh (250µm);
- malha 115 mesh (125µm);
- malha 250 mesh (63µm).
- fundo (recipiente para a parte da amostra com granulometria inferior a 63µm);

O valor do percentual retido em cada malha foi obtido pela seguinte fórmula:

$$\% \text{ Retido} = \frac{MS}{MT} \times 100$$

(Equação 4.1 Cálculo do Percentual de Massa Retido )

Onde: MS = Massa Seca Retida na Peneira (g).

MT = Massa total (g).

#### 4.2.5 Massa Bruta

O objetivo do ensaio de massa bruta foi de determinar composição dos resíduos de areias (A, B e C) em termos espécies químicas, conforme Quadro 4.1, para posterior

comparação com ensaios de lixiviação dos corpos de prova em massa asfáltica, cerâmica e fritas fabricados com os resíduos.

Os materiais utilizados no ensaio foram beakers, chapa de aquecimento, proveta, filtro, Espectrofotômetro de Absorção Atômica, Cromatógrafo, ácido e água destilada.

Procedeu-se a análise do filtrado e calculou-se o resultado conforme as fórmulas abaixo:

$$\text{Conc. Metal em mg/kg (peso massa seca)} = A \times B / g \text{ (amostra)} \quad (1)$$

(Equação 4.2 Cálculo da Massa Bruta)

Onde: A - conc. metal na solução digerida (mg/l)

B – volume final da solução digerida (ml)

Quadro 4.1 Espécies e Métodos de Análise

Parâmetro	Método	Equipamento
Alumínio (mg/l)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Ed 3111D	Espectrofotômetro de Abs Atôm.
Benzeno (mg/l)	EPA 525.1	Cromat Gás com Espect. de Massa
Cálcio (mg/l)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Ed 3111D	Espectrofotômetro de Abs. Atômica
Cloretos (mg/l)	N.A.	
Cobalto (mg/l)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Ed 3111D	Espectrofotômetro de Abs. Atômica
Cobre (mg/l)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Ed 3500 B	Espectrofotômetro de Abs. Atômica
Cromo (mg/l)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Ed 3500 B	Espectrofotômetro de Abs. Atômica
Dureza ( mg/l CaCO <sub>3</sub> )	NA	
Enxofre ( mg/l S-2)	NA	
Etilbenzeno (mg/l)	EPA 525.1	Cromat Gás com Espect. de Massa
Fenol (mg/l)	EPA 525.1	Cromat Gás com Espect. de Massa
Ferro Total (mg/l)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Ed 3111B	Espectrofotômetro de Abs Atôm.
Fluoretos (mg/l)	NA	
Fósforo (mg/l)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Ed 4500 C	Espectrofotômetro Colorimétrico
Magnésio (mg/l)	NA	
Manganês (mg/l)	Método Merck 019 Kit 14770	Espectrofotômetro Colorimétrico
Potássio (mg/l)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Ed 3111B	Espectrofotômetro de Abs Atôm.
Silício (mg/l)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Ed 3111D	Espectrofotômetro de Abs. Atômica
Sódio (mg/l)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Ed 3111B	Espectrofotômetro de Abs Atôm.
Sulfato (mg/l SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	NA	
Tensoativos (mg/l LAS)	NA	
Titânio (mg/l)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Ed 3111D	Espectrofotômetro de Abs. Atômica
Tolueno (mg/l)	EPA 525.1	Cromat Gás com Espect. de Massa
Xileno (mg/l)	EPA 525.1	Cromat Gás com Espect. de Massa
Zinco (mg/l)	Método Merck 041 Kit 14832	Espectrofotômetro de Abs. Atômica
Zircônio (mg/l)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Ed 3111D	Espectrofotômetro de Abs. Atômica

NA – método disponível no laboratório não aplicável para massa bruta.

### ***4.3 Teste de Aplicação dos Resíduos de Areia de Fundição em Massa Asfáltica***

O estudo de aplicação dos resíduos de areia de fundição em massa asfáltica consistiu na avaliação da substituição da areia comum, presente como agregado na massa asfáltica, pelos resíduos de fundição. Cada resíduo (Areias A, B e C) foi testado individualmente como agregado. As massas asfálticas formuladas contendo resíduos foram posteriormente avaliadas perante a qualidade funcional e ambiental e comparadas com a massa asfáltica padrão sem resíduos na sua formulação.

Os ensaios de aplicação de resíduos de fundição seguiram os procedimentos de rotina utilizados para a formulação e estudo de massas asfálticas da empresa de fabricação de asfalto Engepasa Infraestrutura Ltda., em conformidade com as normas do DNER (Departamento Nacional de Estradas e Rodagem) atual DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte) apontados no fluxograma da Figura 4.2 apresentado a seguir::

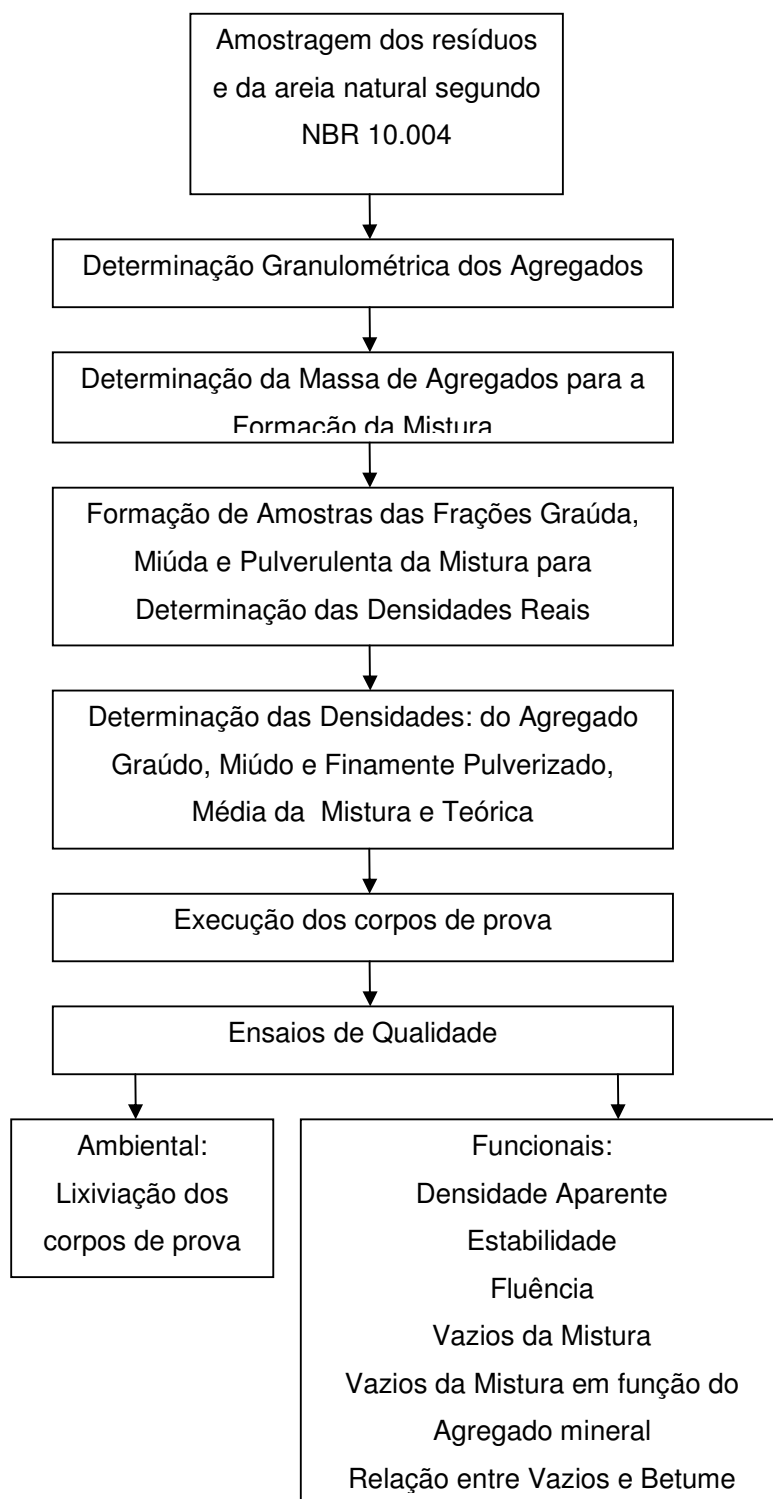


Figura 4.2 Fluxograma do Teste de Aplicação de Resíduos de Fundição em Massa Asfáltica

### 4.3.1 Determinação Granulométrica dos Agregados da Mistura

O objetivo deste ensaio foi de determinar a composição granulométrica dos agregados para a elaboração da mistura dentro da faixa determinada pelo DNER para CBUQ/C.

Foi necessária a utilização dos seguintes materiais: quarteador; balança de pratos, com resolução de 0,1 g; conjunto de peneiras; aquecedor (fonte de calor).

Utilizou-se o seguinte jogo de peneiras:

- peneira 3/4' ( 19,100 mm)
- peneira 1/2' ( 12,700 mm);
- peneira 3/8' ( 9,520 mm);
- peneira n.º 04 ( 4,80 mm);
- peneira n.º 10 ( 2,00 mm);
- peneira n.º 40 (0,420 mm);
- peneira n.º 80 (0,177 mm);
- peneira n.º 200 (0,074 mm);
- fundo (recipiente para a parte da amostra com granulometria inferior a 0,074mm);

O valor do percentual retido em cada peneira foi obtido pela seguinte fórmula:

$$\% \text{ Retido} = \frac{MS}{MT} \times 100$$

(Equação 4.3 Cálculo do Percentual de Massa Retido )

Onde: MS = Massa Seca Retida na Peneira (g).

MT = Massa total (g).

O valor percentual passado em cada peneira foi obtido pelas seguintes fórmulas:

$$MP = MP' - MS$$

(Equação 4.4 Cálculo do Percentual de Massa Passado)

Onde: MP = Material Passado pela Peneira (g)

MP' = Material Passado pela Peneira anterior (g)

$$\% \text{ Passado} = \frac{MP}{MT} \times 100$$

(Equação 4.5 Cálculo do Percentual de Massa Passado)

A partir do percentual passado foi possível determinar a participação de cada agregado da mistura utilizando-se como referência os limites de granulometria especificados para a mistura e suas respectivas faixas de trabalho, conforme Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Limites Granulométricos e Faixa de Trabalho.

<b>Peneira</b>	<b>Limites de Granulometria %</b>	<b>Faixa de trabalho %</b>
3/4'	100	**
1/2'	86-100	+/- 7
3/8'	75-100	+/- 7
n.º 4	50-85	+/- 5
n.º 10	30-75	+/- 5
n.º 40	15-40	+/- 5
n.º 80	8-30	+/- 3
n.º 200	5-10	+/- 2

Foram utilizados na mistura: brita ¾, pedrisco, pó de brita e areia, variando-se os tipos de areia entre:

- Areia Natural – obtida do Rio Itapucu – Região de Jaraguá do Sul – Santa Catarina
- Areia A – obtida do Sistema de Mistura de Areia de Moldagem
- Areia B – obtida do Setor de Quebra de Canais
- Areia C – obtida da Exaustão do Sistema de Areia de Moldagem

#### **4.3.2 Determinação da Massa dos Agregados para a Formação da Mistura**

O objetivo deste ensaio foi determinar a massa de cada agregado conforme seus percentuais granulométricos obtidos do ensaio anterior.

Para isso foi necessária a utilização dos seguintes materiais: balanças com precisão de 0,1 e 0,01 g; recipientes metálicos com capacidade para 1,3 kg; estufa.

Neste ensaio, os seguintes procedimentos foram adotados:



Através do percentual obtido para cada agregado da mistura, calculou-se a sua massa utilizando-se o valor de 1,2 kg para peso total dos agregados dos corpos de prova e o percentual retido em cada peneira.

Manteve-se o peso dos agregados brita  $\frac{3}{4}$ , pedrisco e pó de brita, alternando-se os percentuais de cada areia (A,B,C) em 25, 50, 75 e 100% sobre o valor percentual fixo estabelecido para a areia Natural.

Foram executadas quatro peças para cada percentual de cada areia, sendo duas peças para ensaios de qualidade funcional e duas peças para ensaio ambientais, conforme demonstra Tabela 4.2 abaixo.

Tabela 4.2 Quantidades de Peças Geradas para Ensaios de Qualidade e Ambiental.

Processo	Resíduos				Total
	Sem Resíduo	Areia Sistema (A)	Areia Quebra (B)	Pó Exaustão (C)	
Fabricação Asfalto	4	16	16	16	52
				Total Geral	52

\* Ensaios de Qualidade: reservou-se 26 peças para cada processo

\*\* Ensaios Ambientais: reservou-se 26 peças para cada processo

\*\*\* Sem Resíduo: peça padrão confeccionada conforme processo original.

#### 4.3.3 Formação de Amostras das Frações Graúda, Miúda e Pulverulenta da Mistura para a Determinação das Densidades Reais

O objetivo deste ensaio foi determinar a formação de amostras das frações graúda, miúda e pulverulenta da mistura para o ensaio da densidade real como parte dos procedimentos para determinar a densidade teórica da mistura asfáltica necessária para a avaliação da qualidade dos corpos de prova.

Os materiais utilizados foram: Balanças com precisão de 0,10 e 0,01 g; recipientes para a pesagem dos materiais.

Calculou-se o percentual das frações em relação à mistura total conforme fórmula abaixo descrita:

$$\% \text{ em Relação a Mistura} = \frac{\text{Massa retida na peneira}}{\text{Massa da mistura de agregados}} \times 100$$

(Equação 4.6 Percentual da Fração em Relação à Mistura)

Calcularam-se as frações individuais a partir do percentual em relação à mistura pela fórmula:

$$\text{Fração Individual} = \frac{\% \text{ em relação a mistura}}{\% \text{ total da mistura (graúda, miúda ou pulv.)}} \times 100$$

(Equação 4.7 Cálculo da Fração Individual)

A partir das frações individuais calculou-se a massa das amostras para a execução do ensaio de densidade real, conforme fórmula abaixo:

$$\text{Amostra} = \frac{(\text{Fração Individual} \times \text{Massa Total da Fração ( graúda , miúda ou pulv.)})}{100}$$

(Equação 4.8 Cálculo da Massa das Amostras)

Foram calculadas frações das amostras de todos os materiais envolvidos no estudo. Como não houve variação significativa de peso entre as areias, foram utilizados os cálculos da areia natural para a execução dos ensaios de densidade. Foram pesadas as amostras obtidas contendo as frações graúda, miúda e pulverulenta individualmente e mantidas em estufa até a execução dos ensaios.

#### 4.3.4 Determinação da Densidade do Agregado Graúdo

Este método teve por objetivo determinar a massa específica real, massa específica aparente e absorção de água do agregado graúdo, retido na peneira n° 10, como parte dos procedimentos para determinar a densidade teórica da mistura asfáltica necessária para a avaliação da qualidade dos corpos de prova.

Materiais utilizados: peneira n° 4 (4,76 mm); cesto cilíndrico de tela com abertura inferior a 4,76 mm, de modo que não permita a perda de material e nem a retenção de ar quando submerso; balança com capacidade de 10 kg, com precisão de 1 g.; balança hidrostática com capacidade de 5 kg, com precisão de 0,1 g, dotada de um dispositivo para manter suspenso na água, pelo centro do prato da balança, o recipiente que contém a amostra; tigela esmaltada ou similar para colocar a amostra em imersão; estufa elétrica capaz de manter a temperatura entre 105 °C e 110 °C; tanque ou similar capaz de manter a amostra suspensa totalmente submersa; toalha para secagem da amostra.

Determinou-se a Densidade Aparente (DA) dos grãos através da fórmula:

$$DA = \frac{P_s}{P_h - P_i}$$

(Equação 4.9 Cálculo da Densidade Aparente)

Determinou-se a Densidade Real (DER) através da fórmula:

$$DER = \frac{P_s}{P_s - P_i}$$

(Equação 4.10 Cálculo da Densidade Real)

Determinou-se a Absorção (A) através da fórmula:

$$A = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100$$

(Equação 4.11 Cálculo da Absorção)

Onde:

$P_s$  = peso do agregado seco, em g;

$P_h$  = peso do agregado saturado com superfície seca, em g;

$P_i$  = peso do agregado imerso na água após 24 h, em g;

#### 4.3.5 Determinação da Densidade do Agregado Miúdo

O objetivo deste ensaio foi de determinar a massa específica real dos grãos retidos na peneira n.º 200, por meio de picnômetro como parte dos procedimentos para determinar a densidade teórica da mistura asfáltica necessária para a avaliação da qualidade dos corpos de prova.

Utilizaram-se os seguintes materiais: repartidor de amostras de 1,3 cm de abertura; estufa capaz de manter a temperatura entre 105 °C e 110 °C; cápsulas de alumínio com tampa, com capacidade de aproximadamente 500 cm<sup>3</sup>; balança com capacidade de 2 kg sensível a 0,1 g; picnômetro de 500 cm<sup>3</sup>; termômetro graduado em 0,5 °C, de 0 a 360 °C; cápsula de porcelana ou similar com capacidade de 500 ml; peneiras n.º 10 à 200; funil; bico de gás; dessecador.

Determinou-se a massa específica real através da fórmula:

$$DT = \frac{P_2 - P_1}{(Y_1 / Y_2) * (P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)} \times (Y_1 / Y_t)$$

(Equação 4.12 Cálculo da Massa Específica Real)

Onde:

DT = Densidade Real do Agregado Miúdo a uma temperatura T

$P_1$  = peso do picnômetro seco e vazio, em g;

$P_2$  = peso picnômetro+ amostra, em g;

$P_3$  = peso pic.+amostra+água, em g;

$P_4$  = peso picnômetro+água, em g;

$Y_1/ Y_2$  = relação entre a massa específica da água em T1 e T2 (obtida no Quadro 4.2);

$Y_1/ Y_t$  = relação entre a massa específica da água em T1 e na temperatura desejada (20° C) T

#### 4.3.6 Determinação da Densidade do Material Finamente Pulverizado

Este ensaio consistiu na determinação da massa específica real dos grãos passados na peneira nº 200 (0,074 mm), por meio de Le Chatelier, como parte dos procedimentos para determinar a densidade teórica da mistura asfáltica necessária para a avaliação da qualidade dos corpos de prova.

Utilizou-se os seguintes materiais: balança com capacidade de 200 g, sensível a 0,01g; banho d'água; caixa metálica; frasco de Le Chatelier (conforme Figura 4.9); Querosene; termômetro graduado em 0,5 °C, de 0 a 50 °C.

A massa específica foi dada pela seguinte fórmula:

$$VLD = L_t - L_i \quad e \quad \mu = \frac{P_s}{VLD}$$

(Equação 4.13 Cálculo da Massa Específica do Material Pulverulento)

onde:

VLD = volume do líquido deslocado, em ml;

$L_t$  = Leitura final, em ml;

$L_i$  = Leitura inicial, em ml;

$\mu$  = massa específica real, em g/ml ou g/cm<sup>3</sup>;

$P_s$  = peso do material seco, em g;

### 4.3.7 Determinação da Densidade Média da Mistura

Este ensaio consistiu na determinação da Densidade Média da Mistura fez parte dos procedimentos para determinar a densidade teórica da mistura asfáltica como requisito necessário para a avaliação da qualidade dos corpos de prova.

A partir das percentagens retidas das frações da mistura (graúda, miúda e pulverulenta) e das densidades encontradas para cada fração conforme Tabelas 4.3 e 4.4, foi possível determinar a densidade média da mistura conforme procedimento abaixo:

DENSIDADE REAL DA MISTURA (DR):

$$DR \text{ (mist.)} = 100 / (\%G/DR) + (\%M/DT) + (\%F/M)$$

(Equação 4.14 Cálculo da Densidade Real da Mistura)

DENSIDADE APARENTE DA MISTURA (DA):

$$DA \text{ (mist.)} = 100 / (\%G/DA) + (\%M/DT) + (\%F/M)$$

(Equação 4.15 Cálculo da Densidade Aparente da Mistura)

DENSIDADE MÉDIA DA MISTURA DE AGREGADOS (DM mist.)

$$DM \text{ (mist.)} = DR \text{ (mist.)} + DA \text{ (mist.)} / 2$$

(Equação 4.16 Cálculo da Densidade Média da Mistura de Agregados)

Tabela 4.3 Identificação das Frações dos Agregados

IDENTIFICAÇÃO DAS FRAÇÕES		PERCENTAGEM EM PESO
%GRAÚDO (%G)	RETIDO NA N. 10	50,3
%MIÚDO (%M)	PASS. NA N.10 - RETIDO NA N.200	42,7
% PULV. (%F)	PASSANDO NA N. 200	7,0

Tabela 4.4 Identificação das Densidades dos Agregados

IDENTIFICAÇÃO DAS FRAÇÕES		DENSIDADE	
%GRAÚDO	RETIDO NA N. 10	DR	2,872
		DA	2,819
%MIÚDO	PASS. NA N.10 - RETIDO NA N.200	DT	2,899
% PULV.	PASSANDO NA N. 200	M	2,913

#### 4.3.8 Determinação da Densidade Teórica da Mistura

Determinou-se a Densidade Teórica da Mistura para os cálculos e ensaios de vazios da mistura, agregados e relação betume vazios necessários para a avaliação da qualidade estrutural dos corpos de prova.

Calculou-se a Densidade Teórica da Mistura asfáltica conforme fórmula abaixo:

$$D = (100) / \left( (100 - \%b) / DM(\text{mist.}) + (\%b / D_b) \right)$$

(Equação 4.17 Cálculo da Densidade Teórica da Mistura Asfáltica)

Onde:

DM (mist.) = densidade média da mistura de agregados;

D<sub>b</sub> = densidade do betume (g/cm<sup>3</sup>);

b% = percentual de betume utilizado na mistura asfáltica.

#### 4.3.9 Execução dos Corpos de Prova

Executou-se os corpos de prova da mistura asfáltica com base nas especificações do CBUQ (concreto betuminoso usinado a quente) - Faixa C, estabelecido pelo DNER.

Materiais:

Pedestal de compactação de madeira, dimensões de 203 x 203 x 457 mm, capeado com uma chapa de aço de 305 x 305 x 25 mm. Bloco de madeira preso por quatro cantoneiras a um sólido bloco de concreto. Chapa de aço solidamente ligada ao cepo de madeira. Pedestal instalado de forma que o bloco de madeira fique a prumo, a chapa de aço em nível e o conjunto todo livre de movimento durante a compactação;

Molde de compactação, consistindo de uma placa base, molde e colar de extensão. O molde com diâmetro interno de 101,6 mm e altura aproximada de 90,0 mm, a placa base e o colar são feitos de modo a poderem ser alternados com qualquer das extremidades do molde;

Fixador do molde: dispositivo destinado a manter o molde na posição, sobre o pedestal de compactação;

Haste de aço com 12,7 mm de diâmetro e 500 mm de comprimento tendo as extremidades com formato semi-esférico;

Soquete com sapata circular, plana de 98,4 mm de diâmetro, equipado com um peso de 4536 g, capaz de obter a altura de queda livre especificada de 457,2 mm;

Estufa elétrica capaz de manter temperaturas até 200 °C, com variação de  $\pm 2$  °C;

Conjunto de peneiras requeridas para a faixa granulométrica de projeto;

Termômetro graduado em 2,5 °C, de 30 °C a 250 °C ou outro que atenda as temperaturas de ensaio;

Termômetro graduado em 1 °C, de 0 °C a 60 °C ou outro que atenda as temperaturas de ensaio;

Balança com capacidade de 20 kg sensível a 0,1 g;

Espátula grande ou colher de pedreiro pequena;

Lápis de cera para marcação dos corpos-de-prova;

Dispositivos para aquecimento dos moldes e soquete, tipo chapa quente ou similar;

Papel filtro ou similar com diâmetro igual ao do molde;

Recipientes metálicos em forma de calota esférica munido de duas alças laterais;

Efetuuou-se a mistura dos agregados entre 93° e 149° C. A quantidade de ligante a ser adicionado à mistura foi determinada conforme segue:

$$\text{Massa do betume} = \frac{\text{peso betume}}{\% \text{ agregados}}$$

(Equação 4.18 Cálculo da Massa de Betume)

onde:

$$\text{peso betume} = \text{peso dos agregados} \times \% \text{betume}$$

$$\% \text{ agregados} = 100 - \% \text{ betume}$$

A moldagem dos corpos de prova foi realizada com a mistura ainda aquecida aplicando-se 20 golpes manuais e 75 golpes com soquete de cada lado do molde. Após a moldagem os corpos de prova foram desmoldados e resfriados em temperatura ambiente.

Selecionaram-se corpos de prova para o ensaio de lixiviação aleatoriamente, e os demais foram direcionados para os ensaios fluência, estabilidade, percentagem de vazios e relação betume vazios.

#### 4.3.10 Determinação da Densidade Aparente Individual para os Corpos de Prova

Este ensaio consistiu na determinação da densidade aparente de mistura betuminosa em corpos-de-prova moldados em laboratório com a finalidade de estabelecer uma relação entre a densidade teórica e real da mistura de agregados necessária para a avaliação da qualidade da massa asfáltica.

Foram necessários os seguintes materiais:

Recipiente ou outro dispositivo que permita a pesagem em imersão do corpo-de-prova; Balança hidrostática com capacidade de 5 kg, sensível a 0,1 g, dotada de um dispositivo para manter suspenso na água, pelo centro do prato da balança, o recipiente que contém a amostra; tanque ou similar capaz de manter a amostra suspensa totalmente submersa;

A densidade aparente foi calculada pela fórmula:

$$d = \frac{P_{ar}}{P_{ar} - P_{imerso1}}$$

(Equação 4.19 Cálculo da Densidade Aparente)

onde:

d = densidade aparente do corpo-de-prova;

$P_{ar}$  = peso do corpo-de-prova, determinado ao ar, em g;

$P_{imerso1}$  = peso do corpo-de-prova imerso em água, em g;

Volume =  $P_{ar} - P_{imerso}$

#### 4.3.11 Determinação da Estabilidade e Fluência da Mistura Asfáltica

Este ensaio consistiu na determinação dos parâmetros do ensaio Marshall para misturas betuminosas a quente que tem a finalidade de avaliar a qualidade dos corpos de prova.

Materiais Utilizados:

Prensa capaz de aplicar cargas até 5000 kg, com erro inferior a 2,5 kg, mecânica ou manual, com êmbolo movimentando-se a uma velocidade de 5 cm/min (aproximadamente 0,8 mm/s); medidor de fluência, podendo ter divisões de 1/100 mm ou 1/100"; banho de água com temperatura termostaticamente controlada, capaz de manter a temperatura a 60 °C; termômetro; cronômetro.



Determinou-se a estabilidade como segue:

$$\text{Estabilidade} = \text{Leitura} \times \text{Constante do anel} \times \text{fator de correção}$$

(Equação 4.20 Cálculo da Estabilidade)

onde:

Estabilidade = carga de ruptura do corpo-de-prova, expressa em Kgf;

Constante do anel = constante do anel dinamométrico (295,3%);

Fator de correção = correção da estabilidade em função da altura ou do volume do corpo-de-prova (conforme Quadro 4.3).

Quadro 4.2 Correção da Estabilidade, em função da Espessura ou dos Volumes

<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Espessura (cm)</b>	<b>Fator de correção</b>
368 - 379	4,54 - 4,68	1,79
380 - 392	4,69 - 4,84	1,67
393 - 405	4,85 - 5,00	1,56
406 - 420	5,01 - 5,18	1,47
421 - 431	5,19 - 5,32	1,39
432 - 443	5,33 - 5,47	1,32
444 - 456	5,48 - 5,63	1,25
457 - 470	5,64 - 5,80	1,19
471 - 482	5,81 - 5,95	1,14
483 - 493	5,96 - 6,08	1,08
494 - 499	6,09 - 6,16	1,06
500 - 505	6,17 - 6,23	1,04
506 - 512	6,24 - 6,32	1,02
513 - 518	6,33 - 6,39	1,00
519 - 525	6,40 - 6,48	0,98
526 - 532	6,49 - 6,56	0,96
533 - 540	6,57 - 6,66	0,94
541 - 547	6,67 - 6,75	0,92
548 - 559	6,76 - 6,90	0,89
560 - 573	6,91 - 7,07	0,86

Determinou-se a fluência como segue:

$$\text{Fluência} = (\text{Leitura final} - \text{Leitura inicial}) \times \text{Constante}$$

(Equação 4.21 Cálculo da Fluência)

Onde:

Constante = 3,937%

Fluência = deformação máxima do corpo de prova, em 1/100" ou em mm.

#### **4.3.12 Determinação da Densidade Aparente expressa como Percentual da Densidade da Mistura**

A Densidade Aparente expressa como um percentual da Densidade da Mistura teve a finalidade de estabelecer uma relação entre a densidade real da mistura, medida no ensaio e a densidade teórica da mistura, necessárias para a avaliação da qualidade da massa asfáltica, e é dada pela seguinte fórmula:

$$\% d = \frac{d}{D} \times 100$$

(Equação 4.22 Cálculo da Densidade Expressa

Como Percentual)

Onde:  $d$  = densidade aparente medida no ensaio ( $\text{g/cm}^3$ )

$D$  =  $D$  é a densidade teórica das misturas ( $\text{g/cm}^3$ )

Calculou-se a densidade expressa para cada corpo de prova selecionado para os ensaios de qualidade.

#### **4.3.13 Determinação do Teor de Vazios da Mistura**

O Teor de Vazios da Mistura Asfáltica representa a determinação de espaços vazios na massa asfáltica e sua influencia na qualidade do asfalto como função da durabilidade do asfalto final produzido, e é dado pela seguinte fórmula:

$$\%V_v = 100 - (d\%)$$

Onde:  $\%V_v$  = Teor de Vazios da Mistura Asfáltica

(Equação 4.23 Cálculo do Teor de Vazios da Mistura Asfáltica)

Calculou-se o Teor de Vazios para cada corpo de prova selecionado para os ensaios de qualidade e comparou-se com as especificações estabelecidas pelo DNER ES-P 22/71 faixa C (  $3 \leq V_v \leq 5$  ).

#### 4.3.14 Determinação dos Vazios da Mistura Asfáltica em Função do Agregado Mineral

O Teor de Vazios da Mistura Asfáltica em função do Agregado Mineral (brita, pedrisco, pó de brita e areia) representa a quantidade de espaços vazios existentes em função da quantidade presente de agregados na massa asfáltica , e é dado pela seguinte fórmula:

$$\%VAM = 100 - \frac{d}{DM (Mist.)} \times (100 - \% b)$$

(Equação 4.24 Cálculo dos Vazios da Mistura Asfáltica em Função dos Agregados Minerais)

Onde: %VAM = Teor de Vazios do Agregado Mineral na Mistura Asfáltica

$d$  = densidade aparente medida no ensaio ( $g/cm^3$ )

DM (mist.) = densidade média da mistura de agregados ( $g/cm^3$ )

% b = percentual de betume utilizado na mistura asfáltica

Calculou-se o Teor de Vazios do Agregado Mineral para cada corpo de prova selecionado para os ensaios de qualidade e comparou-se com as especificações estabelecidas pelo DNER ES-P 22/71 faixa C (  $VAM > 16$  ).

#### 4.3.15 Determinação da Relação entre Vazios e Betume

A Relação entre Vazios da Mistura e Betume é importante para determinar o grau de balanço entre agregados, mistura asfáltica e betume, possibilitando uma massa asfáltica mais estável e resistente para as condições de tráfego, e é dada pela seguinte fórmula:

$$\%RBV = \frac{\%VAM - \% V_v}{\% VAM} \times 100$$

(Equação 4.25 Cálculo da Relação entre Vazios e Betume)

Onde: %RBV = Relação entre o teor de Teor de Vazios da Mistura Asfáltica e o teor de betume

Calculou-se a relação entre vazios e betume para cada corpo de prova selecionado para os ensaios de qualidade e comparou-se com as especificações estabelecidas pelo DNER ES-P 22/71 faixa C ( $75 \leq \text{RBV} \leq 82$ ).

#### **4.3.16 Determinação da Lixiviação das Massas Asfálticas**

O objetivo deste ensaio foi comparar a lixiviação de corpos de prova em massa asfáltica com e sem resíduos de areia de fundição na sua composição, tomando-se como referência a norma brasileira ABNT n.º 10.005.

Como não existe norma regulamentada sobre a utilização direta e avaliação ambiental de resíduos transformados em produtos de outros processos, tomou-se como base a norma que é utilizada para a verificação da periculosidade de um resíduo, através da lixiviação de seus constituintes para o meio ambiente. Desta forma, avaliou-se a lixiviação do corpo de prova sem e com o resíduo, comparando-os entre si. Os resultados também foram comparados com os limites de concentrações na qual o produto (ou resíduo, pela NBR 10.004), seria considerado perigoso para o meio e com padrões de potabilidade da água. Os componentes foram analisados conforme Quadro 4.4.

Quadro 4.3 Espécies e Métodos de Análise.

<b>Parâmetro</b>	<b>Método</b>	<b>Equipamento</b>
Alumínio (mg/l)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Ed 3111D	Espectrofotômetro de Abs Atôm.
Benzeno (mg/l)	EPA 525.1	Cromat Gás com Espect. de Massa
Cálcio (mg/l)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Ed 3111D	Espectrofotômetro de Abs. Atômica
Cloretos (mg/l)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Ed 4500 C	Vidraria Geral
Cobalto (mg/l)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Ed 3111D	Espectrofotômetro de Abs. Atômica
Cobre (mg/l)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Ed 3500 B	Espectrofotômetro de Abs. Atômica
Cromo (mg/l)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Ed 3500 B	Espectrofotômetro de Abs. Atômica
Dureza ( mg/l CaCO <sub>3</sub> )	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Ed 2340 C	Vidraria Geral
Enxofre ( mg/l S-2)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Ed 4500 E	Espectrofotômetro Colorimétrico
Etilbenzeno (mg/l)	EPA 525.1	Cromat Gás com Espect. de Massa
Fenol (mg/l)	EPA 525.1	Cromat Gás com Espect. de Massa
Ferro Total (mg/l)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Ed 3111B	Espectrofotômetro de Abs Atôm.
Fluoretos (mg/l)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Ed 4500 D	Eletrodo de íon seletivo
Fósforo (mg/l)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Ed 4500 C	Espectrofotômetro Colorimétrico
Magnésio (mg/l)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Ed 3111B	Espectrofotômetro de Abs Atôm.
Manganês (mg/l)	Método Merck 019 Kit 14770	Espectrofotômetro Colorimétrico
Potássio (mg/l)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Ed 3111B	Espectrofotômetro de Abs Atôm.
Silício (mg/l)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Ed 3111D	Espectrofotômetro de Abs. Atômica
Sódio (mg/l)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Ed 3111B	Espectrofotômetro de Abs Atôm.
Sulfato (mg/l SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	Método Merck 065 Kit 14791	Espectrofotômetro Colorimétrico
Tensoativos (mg/l LAS)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Ed 5540 B	Espectrofotômetro Colorimétrico
Titânio (mg/l)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Ed 3111D	Espectrofotômetro de Abs. Atômica
Tolueno (mg/l)	EPA 525.1	Cromat Gás com Espect. de Massa
Xileno (mg/l)	EPA 525.1	Cromat Gás com Espect. de Massa
Zinco (mg/l)	Método Merck 041 Kit 14832	Espectrofotômetro de Abs. Atômica
Zircônio (mg/l)	Standard Methods 20 <sup>a</sup> Ed 3111D	Espectrofotômetro de Abs. Atômica

#### **4.4 Teste de Aplicação de Resíduos de Areia de Fundição em Cerâmica Vermelha**

O estudo de aplicação dos resíduos de areia de fundição em Cerâmica consistiu na avaliação da substituição de determinadas concentrações de argila (5, 10 e 20%), utilizada como matéria-prima na fabricação de cerâmica vermelha, pelos resíduos de fundição. Cada resíduo (Areias A, B e C) foi testado individualmente. Os corpos de prova em cerâmica vermelha contendo resíduos foram posteriormente avaliados perante a qualidade funcional e ambiental e comparadas com um corpo de prova padrão sem resíduos na sua formulação conforme demonstra fluxograma da Figura 4.3:

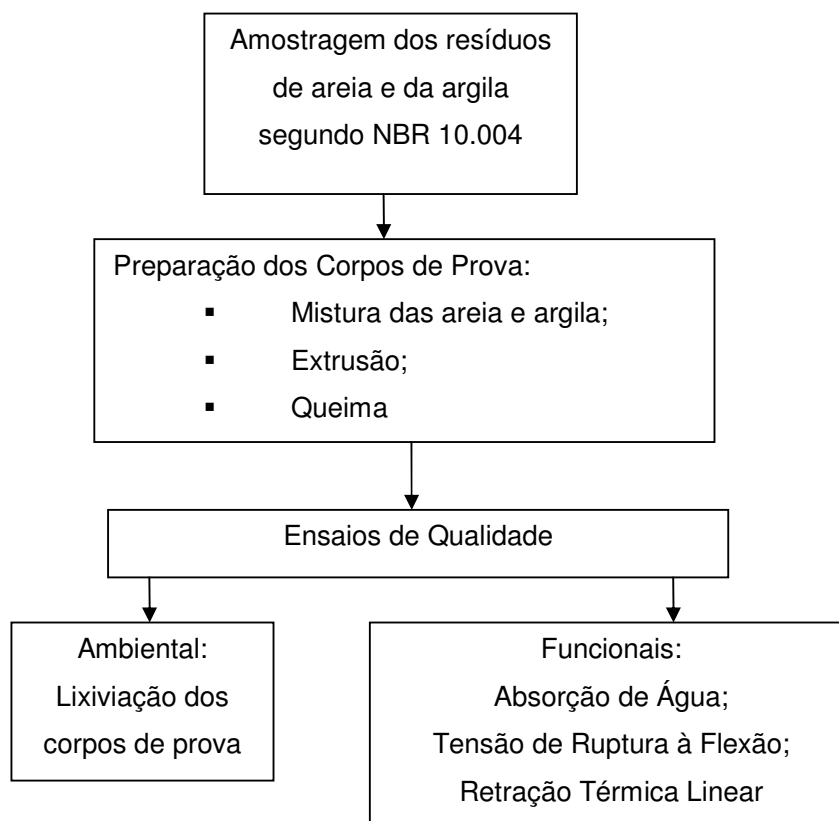


Figura 4.3 Fluxograma do Teste de Aplicação de Resíduos de Fundição em Cerâmica Vermelha.

#### 4.4.1 Preparação dos Corpos de Prova

Este ensaio teve como objetivo a formulação de padrão e três formulações para teste de cada um dos resíduos para a obtenção de corpos de prova por extrusão, secagem e queima.

Para a execução do ensaio foram necessários os materiais:

Extrusora; balança com capacidade de operação de 2 kg e resolução de 0,01g; balança com capacidade de operação de 8 kg e resolução de 0,1g; recipiente retangular de plástico ou alumínio; peneira com abertura de 16 mesh; recipiente com capacidade de 5 L.; colher ou espátula; saco plástico; espátula; pincel; régua; estufa com capacidade de operação de  $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ ; Forno tipo Ciclo Rápido; Forno tipo Mufla; Placas de Cordierita; Luvas de Couro; Tenaz Longa.

Determinou-se a formulação dos corpos de prova mantendo-se o peso da mistura, alternando-se os percentuais de cada areia (A,B,C) em 5, 10, 20 % sobre a massa estabelecida para a argila escolhida para o ensaio, conforme demonstra Tabela 4.5.

Tabela 4.5 Composição das Amostras Analisadas.

<b>Amostra</b>	<b>Percentuais em Massa</b>
Padrão	0 % de Resíduo + 100% de Argila
A5	5 % de Resíduo Areia A + 95% de Argila
A10	10 % de Resíduo Areia A + 90% de Argila
A20	20 % de Resíduo Areia A + 80% de Argila
B5	5 % de Resíduo Areia B + 95% de Argila
B10	10 % de Resíduo Areia B + 90% de Argila
B20	20 % de Resíduo Areia B + 80% de Argila
C5	5 % de Resíduo Areia C + 95% de Argila
C10	10 % de Resíduo Areia C + 90% de Argila
C20	20 % de Resíduo Areia C + 80% de Argila
Total	10 amostras

Foram extrusados corpos de prova de dimensão aproximada de 12cm x 3cm x 1cm e sinterizados em ciclo de queima com temperaturas: 900/930/960/1020 °C, temperatura de queima de 950°C com patamar de queima de 180 minutos, taxa de aquecimento de 5°C/min.

#### 4.4.2 Determinação da Absorção de Água (Método de Fervura)

O ensaio foi executado com o objetivo de determinar a absorção de água dos corpos de prova, utilizando-se o seguinte cálculo:

$$AA = \frac{M - M_0}{M_0} \times 100$$

(Equação 4.26 Cálculo da Absorção de Água)

Onde: AA = Absorção de Água (%).

$M_0$  = Massa seca (g).

M = Massa Úmida (g).

#### 4.4.3 Determinação da Tensão de Ruptura à Flexão

O objetivo deste ensaio foi analisar a resistência mecânica dos corpos de prova.

Utilizaram-se os seguintes materiais:

Estufa; Crômetro; Calculadora.

Para o cálculo do módulo de resistência a flexão do material utilizou-se a seguinte fórmula:

$$M = (3 * F * L) / (2 * b * e^2)$$

(Equação 4.27 Cálculo do Módulo de Ruptura)

Onde: M = Módulo de ruptura em Newtons por mm<sup>2</sup>

e = Mínima espessura do corpo-de-prova, em mm, ao longo da seção de ruptura.

F = Força de ruptura

b = largura da peça

#### 4.4.4 Determinação da Retração Térmica Linear (RL/Dilatometria)

O objetivo deste ensaio foi de avaliar a estabilidade dos corpos de prova perante as deformações que podem ocorrer na fase de queima.

Foram utilizados os materiais:

Paquímetro; Estufa; Calculadora.

Calculou-se a retração, utilizando os seguintes cálculos:



$$EP = \frac{L_0 - 125,16}{L_0} \times 100$$

$$RS = \frac{L_0 - L_1}{L_0} \times 100$$

$$RQ = \frac{L_1 - L_2}{L_1} \times 100$$

$$RT = \frac{L_0 - L_2}{L_0} \times 100$$

(Equação 4.28 Cálculos da Retração Linear)

Onde: EP = Expansão de Prensagem (%).

RS = Retração de Secagem (%).

RQ = Retração de Queima (%).

RT = Retração Total (%).

$L_0$  = Medida da peça crua (mm).

$L_1$  = Medida da peça seca (mm).

$L_2$  = Medida da peça queimada (mm).

#### 4.4.5 Determinação da Lixiviação da Cerâmica

A determinação da lixiviação dos corpos de prova em cerâmica vermelha obedeceu aos mesmos procedimentos aplicados e elementos analisados nos corpos de prova em massa asfáltica. (item 4.3.16). Os corpos de prova separados para a lixiviação foram confeccionados à 850° C por 2 horas.

#### **4.5 Teste de Aplicação de Resíduos de Areia de Fundição em Fritas Cerâmicas**

O estudo de aplicação dos resíduos de areia de fundição em Fritas consistiu na avaliação da substituição de determinadas concentrações de areia fina (30, 60 e 100%), utilizada como matéria-prima, pelos resíduos de fundição. Cada resíduo (Areias A, B e C) foi testado individualmente. Os corpos de prova de fritas cerâmicas contendo resíduos foram posteriormente avaliados perante a qualidade funcional e ambiental e comparados com um corpo de prova padrão sem resíduos na sua formulação.

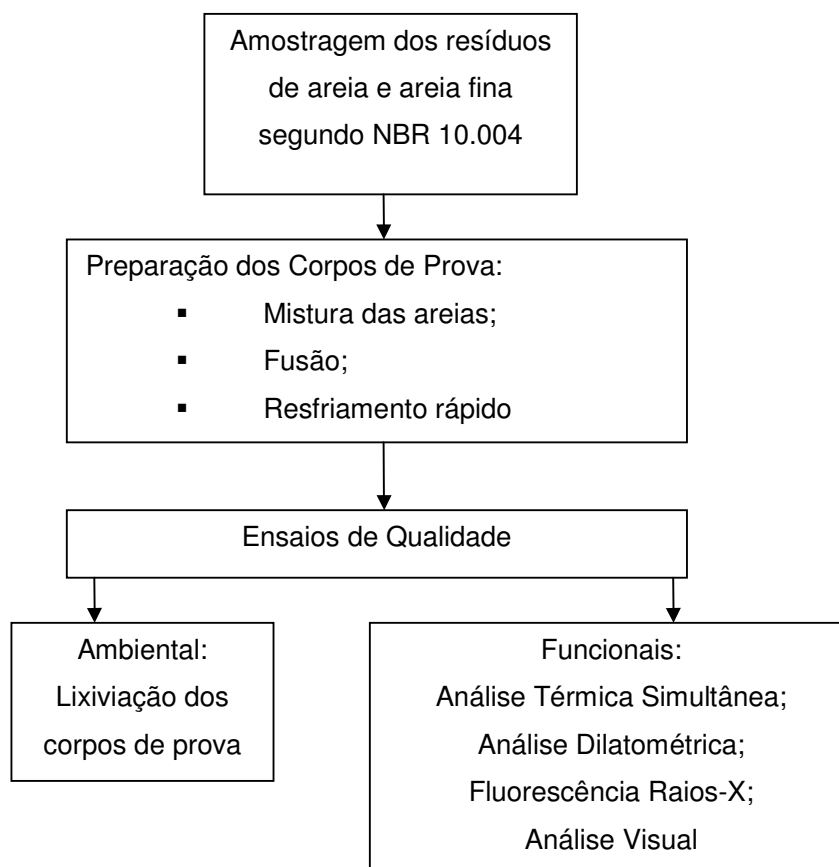


Figura 4.4 Fluxograma do Teste de Aplicação de Resíduos de Fundição em Fritas Cerâmicas.

#### 4.5.1 Preparação dos Corpos de Prova

Formulou-se a amostra padrão e três formulações para teste de cada um dos resíduos para obtenção de corpos de prova por fusão.

Foram utilizados os seguintes materiais:

Balança com capacidade de operação de 2 kg e resolução de 0,01g; Recipiente com capacidade de 5L.; Colher ou espátula; Forno; Tenaz.

Determinou-se a formulação dos corpos de prova mantendo-se o peso da mistura, (01 kg) alternando-se os percentuais de cada areia (A,B,C) em 30, 60, 100 % sobre o material original (quartzo, areia fina) para a fabricação de frita transparente.

Através formulação dos corpos de prova, obtiveram-se as amostras, conforme Tabela 4.6, para ensaios de avaliação da qualidade estrutural e ambiental.

Tabela 4.6 Amostras Analisadas.

<b>Amostra</b>	<b>Percentuais em Massa</b>
Padrão	0 % de Resíduo + 100% de Quartzo (Areia Fina)
A30	30 % de Resíduo Areia A + 70% de Quartzo
A60	60 % de Resíduo Areia A + 40% de Quartzo
A100	100 % de Resíduo Areia A + 0% de Quartzo
B30	30 % de Resíduo Areia B + 70% de Quartzo
B60	60 % de Resíduo Areia B + 40% de Quartzo
B100	100 % de Resíduo Areia B + 0% de Quartzo
C30	30 % de Resíduo Areia C + 70% de Quartzo
C60	60 % de Resíduo Areia C + 40% de Quartzo
C100	100 % de Resíduo Areia C + 0% de Quartzo
Total	10 amostras

Pesou-se todos os materiais conforme calculado e encaminhou-se as misturas para a fusão a 1470° C. A obtenção da frita foi feita pelo rápido resfriamento do material fundido em água.

#### 4.5.2 Análise Química por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X

Este ensaio teve como objetivo analisar a composição química das amostras de fritas cerâmicas estudadas para o conhecimento dos óxidos presentes que atuam no desempenho da qualidade do produto. O ensaio executado seguiu os mesmos procedimentos constantes na seção 4.2.2 – Caracterização de Resíduos/ Análise Química por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X.

#### **4.5.3 Análise Térmica Simultânea (ATD/ATG)**

O objetivo da ATD/ATG foi de observar as variações de massa que ocorrem no aquecimento das amostras e na aplicação de calor a modificações exotérmicas ou endotérmicas como requisito da qualidade para as fritas cerâmicas. O ensaio executado seguiu os mesmos procedimentos constantes na seção 4.2.3 Caracterização de Resíduos/ Análise Térmica Simultânea.

#### **4.5.4 Análise Dilatométrica**

A análise dilatométrica teve como objetivo analisar a mudança de dimensões das amostras de fritas cerâmicas em função da temperatura como requisito para avaliar a qualidade estrutural dos corpos de prova.

Foram utilizados no ensaio: paquímetro com resolução de, no mínimo, 0,01 mm e dilatômetro.

#### **4.5.5 Análise Visual**

O objetivo da análise visual foi preparar de esmaltes a partir de cada uma das formulações, aplicar sobre uma base cerâmica e queimar para comparar com o padrão visual como requisito para avaliar a qualidade funcional das fritas: a aparência perante o consumidor.

Os materiais utilizados foram: almofariz e pistilo; Balança com resolução de 0,01g; Binil; forno.

#### **4.5.6 Determinação da Lixiviação das Fritas Cerâmicas**

A determinação da lixiviação dos corpos de prova em fritas cerâmicas obedeceu aos mesmos procedimentos aplicados e elementos analisados nos corpos de prova em massa asfáltica (item 4.3.16), sendo que se encaminhou-se as amostras diretamente para a lixiviação.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a execução das metodologias de caracterização da produção e das propriedades dos resíduos, da aplicação na fabricação de corpos de prova em massa asfáltica, cerâmica vermelha e fritas cerâmicas foi possível fazer uma análise crítica dos resultados de modo que a verificar o comportamento dos resíduos perante a reutilização.

Este capítulo aborta esta análise crítica como forma de demonstrar o desempenho dos resíduos diante das metodologias utilizadas e a qualidade estrutural e ambiental dos produtos obtidos desta reutilização.

### 5.1 Caracterização da Produção de Resíduos de Fundição

Conforme Relatório Anual de Atividades do IBAMA (ANEXO A), no ano de 2003 a produção de Linha Automotiva Fundidos na Divisão Automotiva Fundição foi de 32.000 toneladas de ferro.

Com relação a produção dos resíduos de fundição têm-se informações que foram obtidas através do monitoramento da quantidade gerada pela empresa, conforme demonstra-se na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 Geração de Resíduos de Fundição (Schulz S.A.).

RESÍDUO	QUANTIDADE GERADA EM 2003 (ton)	CLASSE	DISPOSIÇÃO OU TRATAMENTO	CONTROLE
Areia de Macharia	514,1	I	Regeneração	Retorno ao processo produtivo Controle da Qualidade
Pó da Exaustão (Sistema de Areia)	2.791,9	II	Depósito à Céu Aberto	Monitoramento do lençol freático
Areia do Sistema	4861,6	II	Depósito à Céu Aberto	Monitoramento do lençol freático
Areia da Quebra	9162,2	II	Depósito à Céu Aberto	Monitoramento do lençol freático
Pó do Jato (atividade de acabamento)	1.100,4	II	Depósito à Céu Aberto	Monitoramento do lençol freático
Refratários e Escória	2.512,0	II	Depósito à Céu Aberto	Monitoramento do lençol freático

Os resíduos de fundição estão destacados na Figura 5.1, que apresenta o fluxograma da geração de resíduos.



Figura 5.1 Fluxograma da Geração de Resíduos de Fundição. (Schulz S.A.)

Conforme visto na revisão de literatura, os resíduos de areia de moldagem representam a maior parcela da quantidade gerada de resíduos, 79,24% (Pó da Exaustão + Areia do Sistema + Areia da Quebra). Os resíduos de macharia são convenientemente tratados através de regeneração. Para a produção de 32.000 ton de ferro a geração de resíduos de fundição foi de 66% (21.220,4 ton.) em relação a quantidade de fundidos produzidos, isto porque a regeneração teve seu início no segundo semestre de 2003, não sendo as quantidades regeneradas contabilizadas neste monitoramento. Além disto, existe

retorno da areia de moldagem para o sistema de mistura de areia, reduzindo a geração destes resíduos.

Quanto ao depósito de resíduos de fundição a céu aberto, o mesmo foi avaliado ambientalmente pela empresa CSD-Geoclock (ANEXO B), que concluiu que a deposição de resíduos de fundição, apesar de serem classificados como não inertes, não alterou a qualidade das águas subterrâneas, exceto pelos parâmetros ferro e manganês. Contudo, conforme relatório da empresa estes elementos não estariam contribuindo com toxicidade para o meio. E, as adequações necessárias para o depósito estariam aliadas ao condicionamento geotécnico dos resíduos no solo.

Em função destes aspectos, foram executados os procedimentos experimentais de caracterização e avaliação da condição de uso dos resíduos de areia de moldagem em massa asfáltica, cerâmica vermelha e fritas cerâmicas buscando uma destinação adequada destes resíduos sem que sejam necessárias áreas para disposição.

## **5.2 Caracterização dos Resíduos de Areia de Fundição**

O conhecimento das propriedades dos resíduos é uma etapa do estudo de reutilização útil em determinar se os resíduos atendem as especificações necessárias como matérias primas ou insumos de outros processos. Neste, estudo foram verificadas propriedades para matérias-primas de interesse das atividades de fabricação de asfalto, cerâmica vermelha e fritas cerâmicas.

Determinou-se desta forma:

- A composição química em termos de óxidos presentes, através de Fluorescência de Raios-X;
- O tamanho das partículas, através de Distribuição Granulométrica;
- As variações de massa que ocorrem com os resíduos perante o aquecimento, através de Análise Térmica;
- A composição química em termos de espécies químicas elementares quem podem lixiviar após sua reutilização, através de Análise de Massa Bruta.

### **5.2.1 Análise Química obtida por Fluorescência de Raios-X**

De acordo com a Composição Química dos resíduos obtida por Fluorescência de Raios-x. (Tabela 5.2), todas as areias residuárias possuem quantidade de sílica maior que 50% em massa, sendo que a Areia B (Quebra de Canais) possui 91,59 % em massa e

menores quantidades de outros óxidos presentes. Os resíduos avaliados apresentam condições de aplicação nas atividades em estudo, pois a fabricação de asfalto, cerâmica vermelha ou fritas cerâmicas utilizam sílica como fonte de matéria-prima ou insumo.

Tabela 5.2 Composição Química obtida por FRX.

Composto	Composição (% em Massa)		
	Areia do Sistema - A	Areia da Quebra - B	Pó da Exaustão - C
SiO <sub>2</sub>	89,24	91,59	64,71
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,06	1,84	5,91
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,07	0,74	2,18
CaO	0,15	0,14	0,44
Na <sub>2</sub> O	0,32	0,28	0,81
K <sub>2</sub> O	0,11	0,11	0,27
MnO	<0,01	0,01	0,02
TiO <sub>2</sub>	0,16	0,15	0,41
MgO	0,20	0,19	0,80
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03	0,03	0,06
P.F.	6,67	4,93	24,39

### 5.2.2 Análise Térmica Simultânea

Na análise térmica simultânea foram verificadas as variações de massa que ocorreram com os resíduos durante o aquecimento. Estas observações tiveram especial importância em respeito das aplicações em cerâmica vermelha e fritas cerâmicas, pois as variações de massa com a temperatura podem contribuir para eliminar compostos voláteis indesejáveis e por outro lado também podem contribuir para causar deformação nos produtos finais.

#### Areia A – Sistema :

No ANEXO C. verifica-se na Análise Térmica do resíduo que até a temperatura de 140°C, aproximadamente, houve uma perda de massa de 0,87%. Entre 140°C e 300°C houve uma perda de massa de 0,33%. A 483,1° ocorreu um pico exotérmico com uma perda



de massa de 5,92%. Entre 700°C e 1390°C, aproximadamente, houve uma perda de massa de 0,53%.

#### Areia B – Quebra de Canais:

No ANEXO D, verifica-se na Análise Térmica do resíduo que até a temperatura de 150° C houve uma perda de massa de 0,94%, relativa à saída de água adsorvida. Entre 150°C e 300°C houve uma perda de massa de 0,14%. A 508,2 °C aconteceu um pico exotérmico com uma perda de massa de 4,22%. Entre 700°C e 1390°C aproximadamente, houve uma perda de massa de 0,82%.

#### Pó da Exaustão – C

No ANEXO E, verifica-se na Análise Térmica dos resíduos que até a temperatura de 200°C, aproximadamente houve uma perda de massa de 1,84%, relativa à saída de água adsorvida. Entre 200°C e 310° C houve um ganho de massa de 0,31%. À 533,5°C ocorreu um pico exotérmico com uma perda de massa de 23,52%. Entre 720°C e 1390, aproximadamente, houve uma perda de massa de 1,35%.

Os resultados da Análise Térmica dos resíduos indicaram, de forma geral, que a água e matéria orgânica ou volátil presente nos resíduos são eliminadas próximas de 150° C e 500° C, respectivamente. Isto significa que impurezas indesejáveis serão eliminadas no início do processo não interferindo significativamente na qualidade estrutural dos produtos finais.

### **5.2.3 Distribuição Granulométrica**

O ensaio de distribuição granulométrica forneceu dados relativos ao tamanho dos aglomerados dos resíduos em estudo, apontados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 Distribuição Granulométrica.

<b>PENEIRA/ Dist. Gran. (%)</b>	<b>Areia A - Sistema</b>	<b>Areia B - Quebra</b>	<b>Areia C - Exaustão</b>
16 mesh (1000 – 2000 µm)	0,5	0,6	0,0
32 mesh (500 – 1000 µm)	3,2	4,4	0,3
60 mesh (250 – 500 µm)	55,4	54,3	12,6
115 mesh (125 – 250 µm)	26,0	38,2	31,9
250 mesh (63 - 125µm)	2,7	1,9	16,1
Fundo (<63µm)	12,2	0,6	39,0

Os resultados indicam que as areias estão dispostas na seguinte ordem crescente de granulometria: C < A < B. A Areia A possui 96% das partículas abaixo de 500 µm, a Areia B possui 95% das partículas abaixo de 500 µm e a Areia C possui 87% das partículas abaixo de 250µm. O tamanho encontrado para as partículas é típico de Areias de Fundição. Isto porque estas são adquiridas junto ao fornecedor com requisitos de granulometria pré-determinados em função das características exigidas para compactação nos processos de moldagem.

Com relação às atividades propostas para reuso, a granulometria dos resíduos, não seriam esperados problemas estruturais em função do tamanho das partículas.

### 5.2.4 Análise de Massa Bruta

Os resultados do ensaio de massa bruta, apontados na Tabela 5.4, forneceram informações sobre a composição química dos resíduos em função de espécies que poderiam lixiviar em função da sua aplicação de reuso.

Tabela 5.4 Resultados da Massa Bruta de Resíduos de Areia de Fundição.

Parâmetro (mg/kg)	Amostra		
	Areia A	Areia B	Areia C
Alumínio	4.732,40	4.373,40	9.612,70
Benzeno	<0,050	<0,050	<0,050
Cálcio	54,0	25,0	31,0
Cloretos	NA	NA	NA
Cobalto	2,68	2,34	4,66
Cobre	4,0	4,0	8,0
Cromo	8,22	6,85	13,5
Dureza	NA	NA	NA
Enxofre	NA	NA	NA
Etilbenzeno	<0,050	<0,050	0,05
Fenol	<0,01	<0,01	<0,01
Ferro	3.471,00	3.087,00	5.992,00
Fluoretos	NA	NA	NA
Fósforo	101,3	49,03	115,9
Magnésio	NA	NA	NA
Manganês	38,40	43,00	67,00
Potássio	245,70	269,40	470,30
Silício	24.951,00	23.960,00	35.336,00
Sódio	1.471,000	1.187,000	4.193,000
Tensoativos	NA	NA	NA
Titânio	87,4	117,1	79,4
Tolueno	<0,05	<0,05	<0,05
Zinco	58,2	76,3	137,6
Zircônio	126,0	145,0	146,0
Xileno	<0,05	<0,05	<0,05

Os resíduos apresentaram maiores proporções dos elementos alumínio, ferro, manganês, sódio, silício, titânio, zinco e zircônio, conforme esperado em função das matérias primas do processo de fundição. Não foram encontrados compostos orgânicos acima dos limites de detecção das análises.

### **5.3 Utilização de Resíduos de Areia de Fundição em Massa Asfáltica**

A avaliação da qualidade com relação às respostas estruturais e ambientais dos corpos de prova do teste de aplicação dos resíduos de areia de fundição em massa asfáltica consistiu na comparação das propriedades de granulometria, vazios da mistura, vazios dos agregados, relação entre betume e vazios, estabilidade, fluência e lixiviação, quando da substituição da areia comum, pelos resíduos de fundição.

#### **5.3.1 Análise Granulométrica**

A análise granulométrica do material é de grande importância para a execução dos ensaios dos materiais em estudo, visto que é o primeiro passo para a elaboração dos corpos de prova. Sobretudo, são estabelecidas faixas granulométricas para a mistura visando a melhor compactação dos agregados com o maior aproveitamento de agregados.

A diferença existente entre a determinação da granulometria dos materiais em processos de fundição (conforme Tabela 5.3) e do processo de fabricação asfáltica (conforme Tabela 5.5) , consiste no fato que o primeiro considera o percentual de material passado pelas peneiras do ensaio, enquanto que o segundo considera o percentual de material retido nas peneiras do ensaio. Isto significa que são utilizadas peneiras de aberturas diferenciadas e que as faixas encontradas podem diferenciar-se entre si. Por isso é aconselhável que todo material agregado utilizado na fabricação de asfalto passe pelo processo de determinação de granulometria conforme procedimentos desta atividade.

Na análise granulométrica da areias estudadas foi possível encontrar os resultados conforme Tabela 5.5:

Tabela 5.5 Resultados das Análises Granulométricas da Areia (% retido na peneira)

<b>Peneira</b>	<b>* Areia Natural</b>	<b>*Areia A</b>	<b>*Areia B</b>	<b>*Areia C</b>
10 (2,00 mm)	0,3	0,15	0,2	0,0
40 (0,420 mm)	26,6	18,1	12,1	3,25
80 ( 0, 177 mm)	67,9	73,7	69,4	57,00
200 ( 0,074 mm )	4,7	7,5	15,5	28,44
Fundo (<0,074 mm)	0,5	0,6	2,8	11,31

\* percentual retido na peneira.

Observa-se que para todas as areias em estudo mais de 50% do material encontra-se entre 419 e 177  $\mu\text{m}$ , da mesma forma que a areia natural utilizada como agregado mineral original da massa asfáltica.

Contudo, as granulometrias individuais das areias A, B e C diferem-se entre si, conforme demonstrado nos resultados. A variação da granulometria das areias deve-se ao fato de seu processo de geração ser diferenciado.

Conforme esperado, a areia A possui maior granulometria que as outras areias em virtude de ter pequena quantidade de material que passou pelo processo de fundição, sendo constituída basicamente da mistura original. No caso da areia C, sua granulometria é devida a uma captação de materiais em suspensão no misturador incluindo sílica, pó de carvão e metais.

Desta forma, comparando-se o resultado da areia natural aos resultados das areias de fundição, pode-se dizer que é possível utilizar o material no preparo das misturas asfálticas, variando apenas a sua concentração dentro dos limites granulométricos para a mistura.

Avaliando os resultados das granulometrias, determinou-se o percentual possível para utilização na mistura asfáltica através dos limites especificados.

Para os agregados comuns (brita, pedrisco, pó e areia) utilizaram-se percentuais usuais de misturas asfálticas comuns. Utilizou-se o percentual da areia natural ou comum (Tabela 5.6) como base para estabelecer o percentual das areias testadas.

Tabela 5.6 Percentuais dos Agregados Conforme Valores Bases de Misturas Asfálticas

<b>Mistura Calculada:</b>	
15%	Brita 3/4
25%	Pedrisco
50%	Pó
10%	Areia Natural

Assim, para simular as condições de uso normais de areia alternou-se os percentuais de cada areia (A, B, C) em 25, 50, 75 e 100% sobre o valor percentual fixo (10%) estabelecido para a areia natural.

Foram executadas quatro peças para cada percentual de cada areia, sendo duas peças para ensaios de qualidade e duas peças para ensaio ambientais.

Desta forma obteve-se 26 peças separadas para os Ensaios de Qualidade e 26 peças separadas para os Ensaios Ambientais com a seguinte composição apontada na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 Composição dos Corpos de Prova em Massa Asfáltica

Amostra	Quant. (N.ºpeças)	Composição em Massa (%)				
		Brita	Pedrisco	Pó	Areia Nat.	Resíduo
Areia Natural - Padrão	04	15	25	50	10	00
Areia A – 25%	04	15	25	50	7,5	2,5
Areia A – 50%	04	15	25	50	05	05
Areia A – 75%	04	15	25	50	05	05
Areia A – 100%	04	15	25	50	00	10
Areia B – 25%	04	15	25	50	7,5	2,5
Areia B – 50%	04	15	25	50	05	05
Areia B – 75%	04	15	25	50	05	05
Areia B – 100%	04	15	25	50	00	10
Areia C – 25%	04	15	25	50	7,5	2,5
Areia C – 50%	04	15	25	50	05	05
Areia C – 75%	04	15	25	50	2,5	7,5
Areia C – 100%	04	15	25	50	00	10
Número Total de Corpos de Prova Executados			52 Peças em Massa Asfáltica			

### 5.3.2 Análise das Densidades dos Agregados Minerais e Densidade Teórica da Mistura

Para efetuar os ensaios de densidade dos agregados foi utilizada como referência a areia natural na fração em conjunto com os demais agregados da mistura (brita, pedrisco e pó de brita).

Foi possível proceder desta forma, pois a formação das frações dos agregados para as demais areias apresentou resultados com diferenças de 0,01 a 0,03 percentuais, dentro dos erros inseridos para a resolução das balanças utilizadas.

Tabela 5.8 Densidades dos Agregados Minerais e Densidade Teórica da Mistura asfáltica.

<b>Identificação da Amostra</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Agregado Graúdo Real (DR)	2,872
Aparente (DA)	2,819
Agregado Miúdo (DT)	2,899
Agregado Fino Pulverizado (M)	2,913
Média da Mistura de Agregados (DM mist.)	2,873
Teórica da Mistura Asfáltica (D )	2,591

Analisando as densidades obtidas para os agregados, de acordo com a Tabela 5.8, tem-se que com a diminuição da granulometria aumenta-se o valor da densidade, em consequência do melhor aproveitamento de espaço pelas partículas das frações formadas. Da mesma forma, a Densidade Teórica da Mistura Asfáltica é reduzida pela inclusão da densidade do betume (1,02 g/cm<sup>3</sup>).

Isto quer dizer que quanto maior a densidade dos agregados menor poderá ser a utilização de betume na massa asfáltica, otimizando o processo através da redução do componente mais agressivo ambientalmente da mistura.

### 5.3.3 Análise dos Resultados de Estabilidade, Fluência , Vazios da Mistura, Vazios do Agregado e Relação Betume Vazios

Conforme Engepasa Infraestrutura Ltda., as especificações da mistura asfáltica são dadas conforme Tabela 5.9:

Tabela 5.9 Especificações do Concreto Betuminoso Usinado à Quente CBUQ – faixa C

<b>Parâmetro</b>	<b>Especificação DNER ES-P 22/71 – faixa C</b>
% Vazios da Mistura (Vv)	3 –5
% Vazios do Agregado Mineral (VAM)	> 16
% Relação entre Betume e Vazios (RBV)	75 – 82
Estabilidade (kgf)	400 –1300
Fluência (mm)	8 –16

Fonte : DNER ES-P 22/71 – faixa C

Analisando as especificações do DNIT e comparando-as como os resultados obtidos para cada amostra (ANEXOS F e G), é possível verificar que a adição ou substituição de resíduos de fundição por areia natural atende as condições de estabilidade e deformação necessárias para a massa asfáltica, isto porque todas as amostras testadas encontraram-se dentro dos limites especificados.

Por outro lado, verificando os resultados de vazios na mistura, vazios de agregados e relação entre os vazios e betume, algumas amostras não atenderam às especificações do DNIT, inclusive a areia natural. A explicação destes resultados pode ser dada pelo fato de que durante os ensaios não foram executados testes para a determinação da quantidade ideal de betume, mantendo-o constante, alternando apenas os percentuais de resíduo, sobre a quantidade de areia necessária para a mistura.

Deste modo, como granulometria dos resíduos e areia natural era diferenciada, nas amostras com granulometria menor houve pouca quantidade de vazios na mistura, fazendo com que sobrasse betume na sua composição para preencher a massa asfáltica. Analogamente, nas amostras onde a granulometria apresentou-se maior, a relação entre betume e vazios da mistura foi prejudicada pela falta do betume. Ou seja, nos corpos de prova mais densos, a relação entre betume e vazios na mistura foi prejudicada.

Em conclusão, para os percentuais de 100% de resíduo sobre 10% de areia na mistura, todas as amostras atenderam as especificações, demonstrando que é possível sua utilização diretamente na massa asfáltica. Além disso, é possível determinar a quantidade ideal de betume na mistura, eliminando os problemas apresentados.

#### **5.3.4 Lixiviação**

Os ensaios de lixiviação aplicados aos corpos de prova com resíduo tiveram como objetivo principal verificar a liberação potencial de contaminantes para o meio, comparando-os com corpos de prova sem o resíduo.

As Tabelas 5.10, 5.11 e 5.12 apresentam os resultados obtidos da lixiviação dos corpos de prova. Nota-se que os ensaios foram feitos em duplicata.



Tabela 5.10 Lixiviação dos Corpos de Prova Contendo Areia A ( Sistema)

Parâmetro (mg/l)	Amostra										Comparativos	
	Areia Natural		Areia A								NBR 10.004 Lixiviação	Portaria 1469 - art.16
	Padrão	Padrão	25%	25%	50%	50%	75%	75%	100%	100%		
Alumínio *	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	NE	0,2
Benzeno *	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	NE	NE
Cálcio	2,14	1,23	1,16	1,18	1,82	1,8	1,36	1,24	1,87	2,56	NE	NE
Cloretos	2,8	1,4	1,4	2,1	4,2	2,1	2,8	2,8	4,9	2,8	NE	250
Cobalto **	0,0005	0,0005	0,0016	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	NE	NE
Cobre *	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	NE	2
Cromo *	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	5	0,05
Dureza	10	6	10	4	8	8	6	4	4	6	NE	500
Enxofre *	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	NE	NE
Etilbenzeno *	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	NE	0,2
Fenol *	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	NE	NE
Ferro **	0,057	0,045	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	0,148	<0,03	<0,03	NE	0,3
Fluoretos	0,349	0,354	0,32	0,366	0,357	0,394	0,38	0,326	0,405	0,347	NE	1,5
Fósforo *	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	NE	NE
Magnésio	0,227	0,158	0,136	0,149	0,154	0,154	0,127	0,096	0,157	0,214	NE	NE
Manganês *	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	NE	0,1
Potássio	2,04	0,935	0,358	0,293	1,75	0,789	2,39	1,21	4,57	0,772	NE	NE
Silício **	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	NE	NE
Sódio	0,916	0,456	1,06	0,621	1,38	1,59	1,48	0,91	2,24	2,42	NE	200
Sulfato *	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	NE	250
Tensoativos *	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	NE	0,5
Titânio *	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	NE	NE
Tolueno *	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	NE	0,17
Zinco **	0,055	0,054	0,044	0,067	0,03	0,03	0,03	0,044	0,03	0,03	NE	5
Zircônio	2,07	1,63	2,68	2,72	2,84	3,7	2,81	3,7	5,75	4,36	NE	NE
Xileno *	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	NE	0,3

\*Valores iguais ao limite de detecção do ensaio /\*\*Menores valores iguais ao limite de detecção do ensaio/ NE-Não Especificado.

Tabela 5.11 Lixiviação dos Corpos de Prova Contendo Areia B (Quebra de Canais)

Parâmetro (mg/l)	Amostra										Comparativos	
	Areia Natural		Areia B								NBR 10.004 Lixiviação	Portaria 1469 - art.16
	Padrão	Padrão	25%	25%	50%	50%	75%	75%	100%	100%		
Alumínio *	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	NE	0,2
Benzeno *	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	NE	NE
Cálcio	2,14	1,23	2,62	1,84	2,51	1,38	1,71	2,43	3,34	1,95	NE	NE
Cloretos	2,8	1,4	2,8	2,1	2,1	2,1	1,4	2,1	2,8	2,8	NE	250
Cobalto **	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,001	0,0069	0,0005	0,0005	NE	NE
Cobre *	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	NE	2
Cromo *	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	5	0,05
Dureza	10	6	8	8	6	8	8	8	10	6	NE	500
Enxofre *	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	NE	NE
Etilbenzeno *	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	NE	0,2
Fenol *	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	NE	NE
Ferro **	0,057	0,045	0,03	0,03	0,03	0,054	0,03	0,03	0,03	0,03	NE	0,3
Fluoretos	0,349	0,354	0,366	0,331	0,336	0,408	0,357	0,403	0,343	0,324	NE	1,5
Fósforo **	0,03	0,03	0,03	0,03	0,054	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	NE	NE
Magnésio	0,227	0,158	0,385	0,191	0,31	0,124	0,124	0,177	0,132	0,095	NE	NE
Manganês *	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	NE	0,1
Potássio	2,04	0,935	0,717	0,892	0,772	0,444	0,534	0,721	0,598	0,328	NE	NE
Silício **	0,5	0,5	0,9	0,9	0,9	0,8	0,9	1	0,9	0,9	NE	NE
Sódio	0,916	0,456	1,16	0,416	0,754	8,67	0,475	0,793	0,503	0,456	NE	200
Sulfato *	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	NE	250
Tensoativos *	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	NE	0,5
Titânio *	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	NE	NE
Tolueno *	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	NE	0,17
Zinco **	0,055	0,054	0,48	0,03	0,03	0,324	0,03	0,03	0,03	0,03	NE	5
Zircônio	2,07	1,63	5,19	5,72	5,82	6,92	7,85	6,63	7,47	7,74	NE	NE
Xileno *	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	NE	0,3

\*Valores iguais ao limite de detecção do ensaio /\*\*Menores valores iguais ao limite de detecção do ensaio/ NE-Não Especificado.

Tabela 5.12 Lixiviação dos Corpos de Prova contendo Areia C (Exaustão).

Parâmetro (mg/l)	Amostra										Comparativos	
	Areia Natural		Areia C								NBR 10.004 Lixiviação	Portaria 1469 - art.16
	Padrão	Padrão	25%	25%	50%	50%	75%	75%	100%	100%		
Alumínio *	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	NE	0,2
Benzeno *	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	NE	NE
Cálcio	2,14	1,23	1,51	1,58	2,54	1,54	1,2	1,14	1,55	1,73	NE	NE
Cloretos	2,8	1,4	2,1	2,1	2,8	2,1	2,1	2,1	3,5	2,8	NE	250
Cobalto **	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0286	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	NE	NE
Cobre *	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	NE	2
Cromo *	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	5	0,05
Dureza	10	6	6	8	10	4	4	6	8	10	NE	500
Enxofre *	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	NE	NE
Etilbenzeno *	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	NE	0,2
Fenol *	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	NE	NE
Ferro **	0,057	0,045	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	NE	0,3
Fluoretos	0,349	0,354	0,408	0,356	0,476	0,302	0,323	0,425	0,467	0,449	NE	1,5
Fósforo **	0,03	0,03	0,08	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	NE	NE
Magnésio	0,227	0,158	0,169	0,151	0,229	0,163	0,12	0,098	0,137	0,169	NE	NE
Manganês *	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	NE	0,1
Potássio	2,04	0,935	0,499	0,587	0,952	0,549	0,336	0,358	2,24	0,597	NE	NE
Silício **	0,5	0,5	0,8	1	1,1	1	1	1,1	1,1	1,1	NE	NE
Sódio	0,916	0,456	1,47	0,989	2,22	1,3	2,18	1,53	2,28	2,26	NE	200
Sulfato *	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	NE	250
Tensoativos *	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	NE	0,5
Titânio *	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	NE	NE
Tolueno *	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	NE	0,17
Zinco **	0,055	0,054	0,03	0,03	0,155	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	NE	5
Zircônio	2,07	1,63	9,03	8,64	8,21	8,86	9,72	10,15	9,65	10,09	NE	NE
Xileno *	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	NE	0,3

\*Valores iguais ao limite de detecção do ensaio /\*\*Menores valores iguais ao limite de detecção do ensaio/ NE-Não Especificado.

### Discussão:

Analisando os resultados encontrados para os corpos de prova contendo formulações de resíduos A, do sistema de areia, B, da quebra de canais e C da exaustão, é possível dizer que a variação encontrada em função do corpo de prova padrão, sem resíduo contendo apenas areia natural de rio, não é significativa.

Em geral, os parâmetros analisados ficaram abaixo dos resultados encontrados para o padrão, sendo que, algumas anomalias encontradas para parâmetros como cobalto, cálcio, sódio, zinco, ferro foram desconsideradas em virtude de suas duplicatas encontrarem-se dentro do padrão.

Os parâmetros silício, zircônio, sódio analisados encontraram-se acima dos resultados verificados para o padrão, pela inclusão da areias que contém essas espécies na sua formulação verificadas na sua caracterização.

No lixiviado da Areia A os resultados de silício, zircônio, sódio e fluoretos excederam os da amostra padrão para todas as formulações. Na Areia B, os resultados excederam o padrão no parâmetro fluoretos com 25, 75 e 100% de resíduos sobre o percentual fixo de areia natural (10%) e nos parâmetros sódio e silício para todas as formulações com resíduos. Na Areia C, apenas os parâmetros fluoretos, silício e sódio excederam o padrão.

A indústria asfáltica normalmente não considera este tipo de avaliação quanto à qualidade do seu produto obtido. Em função disto, não é possível prever neste momento o que aconteceria se a areia natural apresentasse os mesmos valores obtidos para as areias residuárias. Deste modo, apesar das quantidades lixiviadas acima da amostra padrão, os resíduos estariam atendendo as exigências para a fabricação de asfalto. A solução para os problemas ambientais decorrentes da lixiviação de determinadas espécies estaria voltada para o estudo de concentrações adequadas dos materiais ou da utilização de materiais encapsulantes, tais como argilas, concreto, etc.

Os parâmetros alumínio, cobre, cromo, manganês, titânio, se apresentaram abaixo dos limites de detecção nas amostras, demonstrando que os corpos de prova não possuem estes metais acima das concentrações especificadas nas análises. Da mesma forma, os parâmetros orgânicos de benzeno, etilbenzeno, tolueno, xileno e fenol também ficaram abaixo dos limites de detecção. Além disso, os resultados para enxofre, fósforo, sulfato e tensoativos também não foram encontrados acima dos limites de detecção.

Adicionalmente, comparando-se os resultados encontrados nos lixiviados das amostras com os padrões de potabilidade de água para o consumo humano, conforme decreto n.º 1.469, de 29/12/00, a massa asfáltica formulada com resíduos de fundição não apresenta potencial de contaminação pois não foram encontrados contaminantes nos lixiviados analisados em concentrações acima ou próximas das estabelecidas pela referida legislação.

Como a utilização de resíduos não compromete os corpos de prova no requisito de lixiviação, é possível utilizar até 10% de resíduos de fundição sendo ele areia do sistema, areia da quebra de canais ou pó da exaustão do sistema de areia em substituição da areia natural, deixando desta forma de descartar o resíduo em aterros e poupando recursos naturais, preservando por mais tempo as jazidas de areia.

Assim, a massa asfáltica poderia ser composta de:

- 10% de resíduos de fundição;
- 15% de brita  $\frac{3}{4}$ ;
- 25% de pedrisco;
- 50% de pó de brita e
- 6% de CAP ou betume, atendendo a qualidade estrutural e ambiental para a fabricação de asfalto.

## 5.4 Utilização de Resíduos de Areia de Fundição em Cerâmica Vermelha

A avaliação da qualidade com relação às respostas estruturais e ambientais dos corpos de prova do teste de aplicação dos resíduos de areia de fundição em cerâmica vermelha consistiu na comparação das propriedades de absorção d'água, retração linear, resistência mecânica e lixiviação, quando da substituição da argila, pelos resíduos de fundição.

### 5.4.1 Resultados das Características de Qualidade dos Corpos de Prova

As amostras foram submetidas aos ensaios típicos de interesse para a qualidade de produtos com o uso de novas matérias-primas na indústria cerâmica. Neles foi verificada a absorção da água, a retração e a resistência mecânica dos corpos de prova.

A absorção d'água é uma medida do grau de sinterização do material e está relacionado à qualidade do tijolo. Em geral, uma menor absorção d'água representa uma maior resistência mecânica e, por conseguinte, maior qualidade do tijolo. Avaliando os resultados (Figura 5.2), pode-se dizer que a adição dos diferentes tipos de resíduos reduziu a absorção d'água das amostras analisadas.

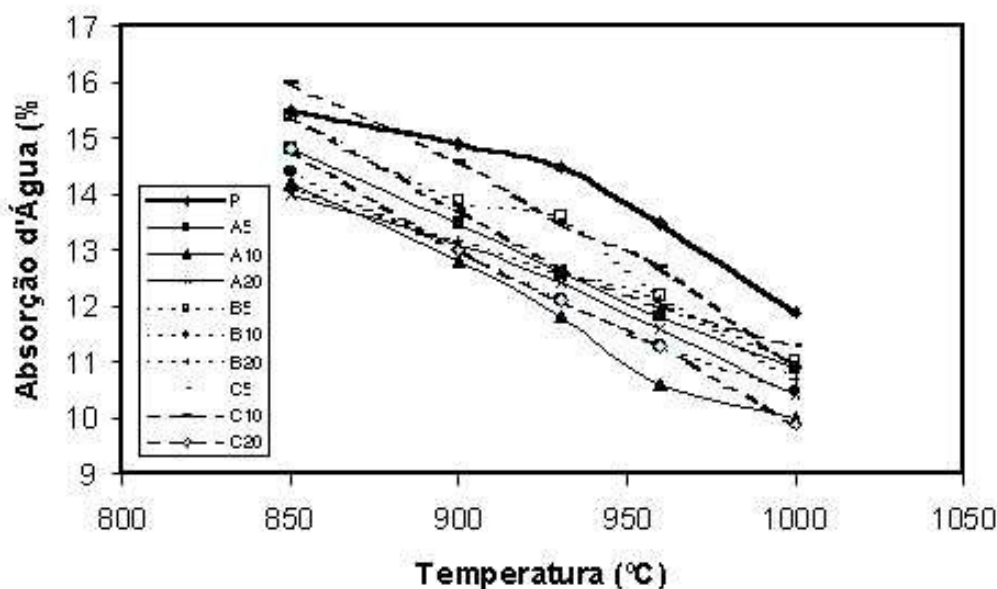


Figura 5.2 Absorção d'Água das Amostras Estudadas das Curvas de Sinterização

A retração linear ocorrida durante a sinterização é de especial interesse, principalmente com relação ao aspecto visual e sua padronização de tamanho. Com respeito à retração linear, os resultados (Figura 5.3) mostram que a adição dos diferentes tipos de resíduos aumentou esta propriedade, como um resultado da maior sinterabilidade do material. Entretanto, o aumento observado foi pequeno, de forma que problemas de instabilidade dimensional não seriam esperados.

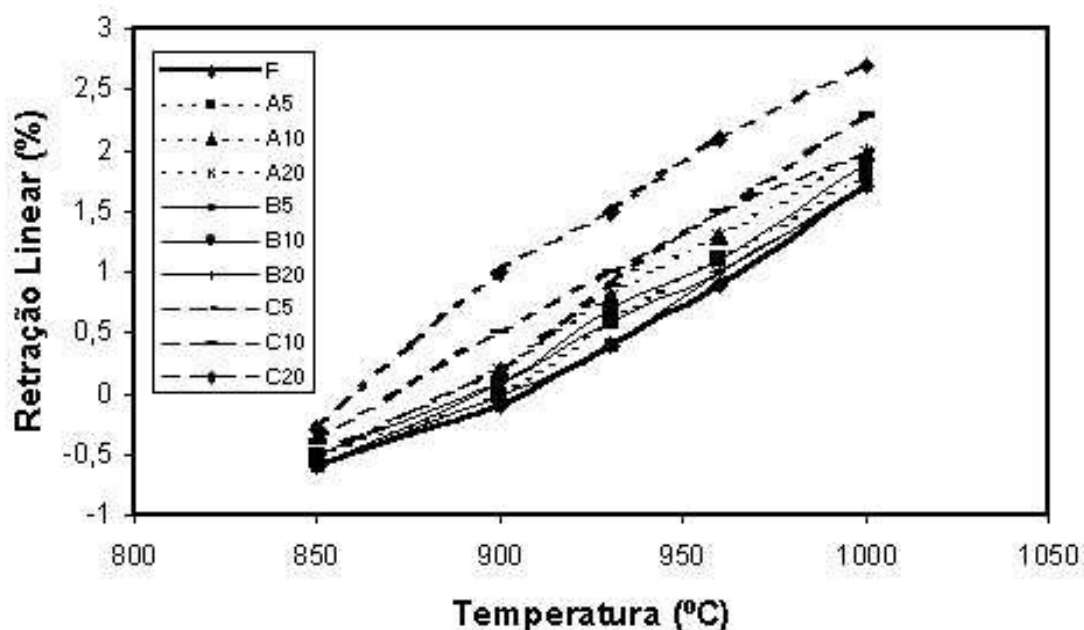


Figura 5.3 Retração Linear das Amostras Estudadas das Curvas de Sinterização

Já com respeito à resistência mecânica (Figura 5.4), os dados mostram que os melhores resultados foram conseguidos com o resíduo C para as três concentrações testadas (5, 10 e 20% em massa). Houve, para este resíduo, um aumento importante na resistência mecânica do material, em relação à amostra padrão. Para os resíduos A e B, os valores obtidos foram equiparáveis ao padrão, exceto para a formulação contendo 20% destes resíduos, onde houve uma redução na resistência mecânica, apesar de estar ainda em um valor admissível.

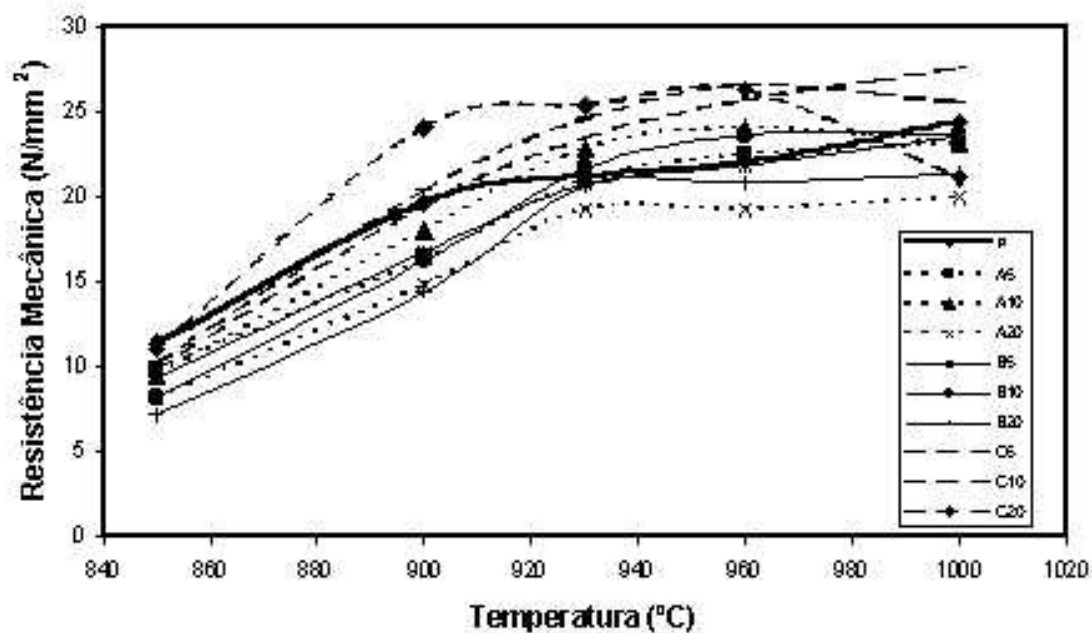


Figura 5.4 Resistência Mecânica das Amostras Estudadas das Curvas de Sinterização

### 5.4.2 Lixiviação

Os ensaios de lixiviação aplicados aos corpos de prova com resíduo tiveram como objetivo principal verificar a liberação potencial de contaminantes para o meio, comparando-os com corpos de prova sem o resíduo. A Tabela 5.13 apresenta os resultados da lixiviação dos corpos de prova em cerâmica vermelha.

Tabela 5.13 Lixiviação dos Corpos de Prova em Cerâmica Vermelha.

Parâmetro (mg/l)	Amostra										Comparativos	
	Sem Areia	Areia A			Areia B			Areia C			NBR 10.004	Portaria
	Padrão	5%	10%	20%	5%	10%	20%	5%	10%	20%	Lixiviação	1469 - art.16
Alumínio *	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	NE	0,2
Benzeno *	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	NE	NE
Cálcio	1,35	3,29	4,75	9,71	4,2	5,21	6,91	5,83	9,68	8,79	NE	NE
Cloretos	2,8	4,2	2,1	1,4	2,1	2,1	2,1	2,1	1,4	1,4	NE	250
Cobalto **	0,00005	0,00005	0,00005	0,0035	0,0005	0,015	0,0014	0,0038	0,0034	0,0105	NE	NE
Cobre *	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	NE	2
Cromo *	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	5	0,05
Dureza	22	22	28	56	22	32	42	32	56	60	NE	500
Enxofre *	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	NE	NE
Etilbenzeno *	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	NE	0,2
Fenol *	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	NE	NE
Ferro *	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	NE	0,3
Fluoretos	0,338	0,654	0,418	0,394	0,347	0,516	0,532	0,496	0,43	0,454	NE	1,5
Fósforo **	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,2	NE	NE
Magnésio	0,9	1,12	1,78	5,63	1,7	1,54	3,18	2,81	4,59	6,39	NE	NE
Manganês *	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	NE	0,1
Potássio	20,6	13,8	13,4	11,5	13,1	11,1	12,7	12	16,5	20,6	NE	NE
Silício	3,9	2,8	2,5	1,9	2,6	2,4	2,7	2,6	2,7	2,6	NE	NE
Sódio	2,4	1,75	1,75	1,74	2,04	1,5	2,12	1,56	2,79	3,96	NE	200
Sulfato **	25	25	36	41	25	25	37	25	63	78	NE	250
Tensoativos *	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	NE	0,5
Titânio *	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	NE	NE
Tolueno *	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	NE	0,17
Zinco **	0,03	0,03	0,45	0,059	0,042	0,061	0,051	0,038	0,061	0,063	NE	5
Zircônio	5,7	4,74	5,13	6,88	6,09	7,32	8,78	6,23	5,97	7,23	NE	NE
Xileno *	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	NE	0,3

\*Valores iguais ao limite de detecção do ensaio / \*\*Menores valores iguais ao limite de detecção do ensaio/ NE – Não Especificado.

Analisando os resultados encontrados para os corpos de prova contendo formulações de resíduos A, do sistema de areia, B, da quebra de canais e C da exaustão, é possível dizer que houve variação em função do corpo de prova padrão, sem resíduo contendo apenas argila. Em geral, os resultados do lixiviado dos parâmetros sódio, sulfato, cálcio, cloretos, cobalto, dureza, fluoretos, magnésio, zinco e zircônio ficaram acima dos valores encontrados para o padrão. Nas amostras formuladas com areia C – pó da exaustão essa diferença demonstrou-se mais acentuada, proporcionalmente conforme sua caracterização.

Os parâmetros silício, potássio e cloretos encontraram-se abaixo dos resultados verificados para o padrão.

O parâmetros alumínio, cobre, cromo, ferro, manganês, titânio, não foram encontrados acima dos limites de detecção nas amostras.

Da mesma forma não foram encontrados nas amostras os parâmetros orgânicos de benzeno, etilbenzeno, tolueno, xileno e fenol. Além disso, os resultados para enxofre, fósforo e tensoativos se apresentaram também abaixo dos limites de detecção.

## Discussão

Verificando a qualidade das peças é possível dizer que o aumento de espécies como sais de cálcio, magnésio ou sódio, no nível encontrado nos resultados dos lixiviados, teve influência sobre suas características, melhorando-as em alguns casos, significando a presença de corpos de prova com maior dureza e conseqüentemente mais resistentes. Entretanto, com a adição de 20% em massa de resíduo na formulação da cerâmica a resistência do material foi diminuída e ao mesmo tempo houve uma maior lixiviação destes constituintes. Isto demonstrou que com 20% em massa de resíduo o excesso de dureza dos corpos de prova influenciou tanto a qualidade estrutural quanto ambiental. Logo, torna-se mais adequado utilizar o resíduo em formulações próximas à 10% em massa, proporcionando a melhoria do produto sem alterar significativamente sua composição.

Adicionalmente, comparando-se os resultados encontrados nos lixiviados das amostras com os padrões de potabilidade de água para o consumo humano, conforme decreto n.º 1.469 ,de 29/12/00, a cerâmica para tijolos formulada com resíduos de fundição não apresenta potencial de contaminação pois não foram encontrados contaminantes nos lixiviados analisados em concentrações acima ou próximas das estabelecidas pela referida legislação.

## ***5.5 Utilização de Resíduos de Areia de Fundição em Fritas Cerâmicas***

A avaliação da qualidade com relação às respostas estruturais e ambientais dos corpos de prova do estudo de aplicação dos resíduos de areia de fundição em fritas cerâmicas consistiu na comparação das propriedades químicas, térmicas, dilatométricas, visuais e de lixiviação, quando da substituição de quartzo (areia fina), pelos resíduos de fundição.

### **5.5.1 Resultados das Características de Qualidade dos Corpos de Prova**

As amostras foram submetidas aos ensaios típicos de interesse para a qualidade de produtos com o uso de novas matérias-primas na indústria de fabricação de fritas cerâmicas, sendo verificada a análise química, a análise térmica simultânea, a análise dilatométrica e o padrão visual dos corpos de prova.



## Fluorescência de Raios X:

A Tabela 5.14 apresenta os resultados da composição química das amostras estudadas.

Tabela 5.14 Composição Química Obtida por FRX das Amostras Estudadas (% em massa)

COMPOSTO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% em peso)									
	P	A30	A60	A100	B30	B60	B100	C30	C60	C100
SiO <sub>2</sub>	61,67	61,37	61,38	61,80	62,48	61,51	61,48	62,29	61,87	61,49
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,33	7,00	7,65	7,87	7,7	7,56	8,26	7,97	8,28	9,82
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,14	0,31	0,36	0,52	0,61	0,43	0,54	0,42	0,58	0,81
CaO	15,53	15,16	15,14	15,33	14,76	15,70	15,12	14,86	15,61	15,63
Na <sub>2</sub> O	3,04	3,24	3,02	2,91	2,99	3,08	2,87	2,71	2,89	2,38
K <sub>2</sub> O	2,28	1,7	1,95	1,83	1,85	1,85	1,81	1,80	1,83	1,64
MnO	< 0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
TiO <sub>2</sub>	0,06	0,09	0,09	0,12	0,10	0,10	0,12	0,11	0,14	0,20
MgO	1,96	2,05	1,69	2,12	1,80	2,00	1,93	1,88	2,09	2,05
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,09	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06
ZnO	3,99	3,67	4,84	2,88	4,13	3,71	3,67	3,04	2,49	1,47
ZrO <sub>2</sub>	0,43	1,60	0,46	1,01	0,65	0,54	0,94	0,83	0,72	1,29
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,49	3,75	3,36	3,54	3,11	3,44	3,20	4,02	3,40	3,14
P.F.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Através dos resultados apontados na Tabela 5.14, é possível dizer que a variação verificada nas composições, mesmo em pequenas concentrações, em alguns elementos é considerada importante.

O Ferro é um elemento que, assim como o Titânio, dá uma coloração à fritada e, por isso, é desejável que estejam presentes em pequenos percentuais. A Tabela 5.16 mostra que, nos casos em questão, o aumento foi significativo e isto pode ser comprovado visualmente nas peças aplicadas e queimadas sobre uma base cerâmica. Nelas, percebe-se que há uma tendência a uma tonalidade amarelada.

Os elementos Sódio, Potássio e Boro são fortes fundentes, isto é, agem baixando o ponto de fusão das fritas. Em geral, a Tabela 5.16 mostra que houve redução na quantidade de fundente, quando da substituição parcial ou total do quartzo original pelos resíduos. Isto ajuda a explicar porque, nas peças aplicadas sobre uma base cerâmica, todos os testes mostraram que as fritas não fundiram bem. Por fim, o teor de Zircônio aumentou com a utilização dos resíduos. Este elemento é conhecido como opacificante, além de possuir um caráter refratário. Este comportamento também ajuda a explicar o fato das amostras testadas terem apresentado um aspecto leitoso.

### Análise Visual:

Com respeito à preparação de esmaltes a partir das fritas obtidas e posterior aplicação dos mesmos, comparativamente à frita padrão, observou-se que a adição dos resíduos testados alterou completamente o aspecto visual dos esmaltes. Os esmaltes contendo os resíduos apresentaram-se menos transparentes ou até mesmo opacos, provavelmente em função da presença, principalmente, de óxido de zinco e óxido de zircônio. Ambos são óxidos opacificantes, mas o primeiro é usado na obtenção de esmaltes mates, enquanto que o segundo é muito usado na obtenção de esmaltes opacos brancos e brilhantes, a partir de uma frita transparente. Todos apresentaram uma leve coloração amarelada, devido à presença de óxido de ferro e óxido de titânio nos resíduos. Em geral, também, os esmaltes contendo fritas à base dos resíduos apresentaram aglomerados conhecidos como fusos, que são fritas não fundidas e, conseqüentemente, não homogeneizadas.

### Análise Térmica Simultânea:

A Figura 5.5 apresenta o resultado de análise térmica simultânea para uma frita padrão.

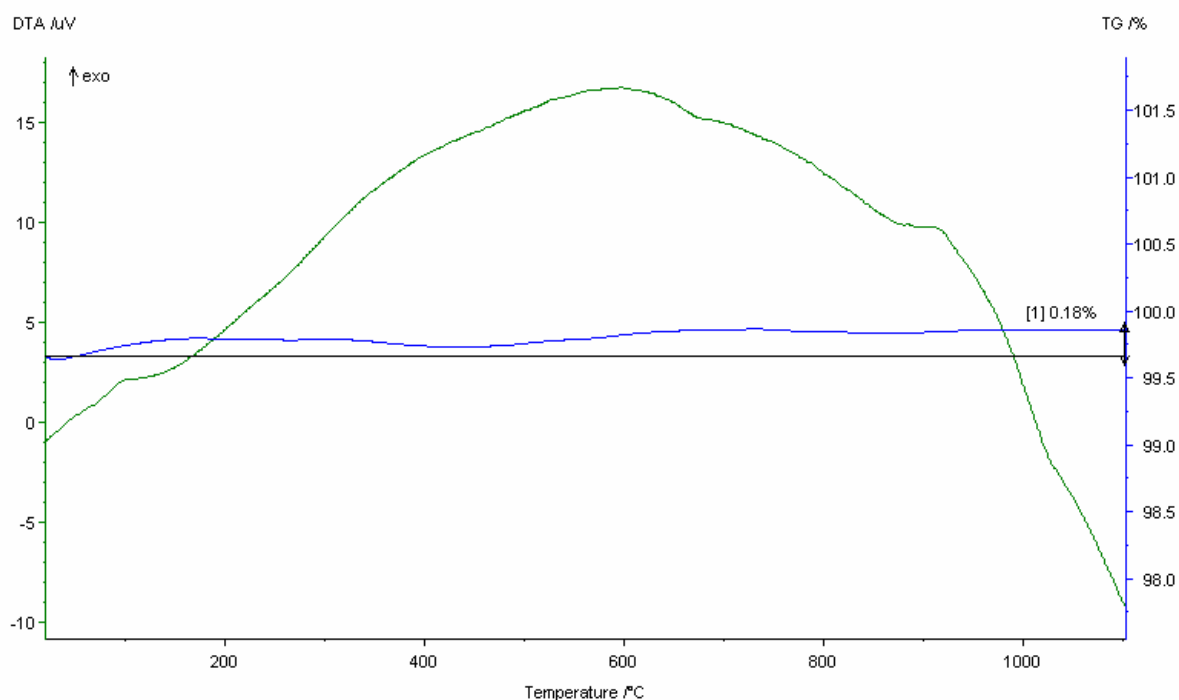


Figura 5.5 Análise Térmica Simultânea da Frita Padrão

Em relação à variação de massa, verificada por meio do ATG, não houve variação significativa de perda de massa, já que as oscilações observadas estão dentro da incerteza da medida;

Para o resíduo A (Figuras 5.6, 5.7 e 5.8), observa-se que o comportamento das curvas são semelhantes entre si, porém diferentes em relação ao padrão (frita original). Três são os parâmetros que tradicionalmente são avaliados em um ATD de uma frita cerâmica: a Temperatura de Transição Vítrea ( $T_g$ ), a Temperatura de Cristalização ( $T_c$ ) e a Temperatura de Fusão ( $T_m$ ). Aparentemente,  $T_c$  não foi afetada pela presença do resíduo, pois o pico de cristalização manteve-se inalterado em relação à frita padrão, mantendo-se em torno de 920°C. Já com respeito a  $T_m$ , observa-se que houve uma pequena redução na temperatura de fusão do vidro, devido à combinação de alterações na composição química do vidro, com redução de alguns elementos de caráter refratário e aumento de outros que atuam como fundentes;

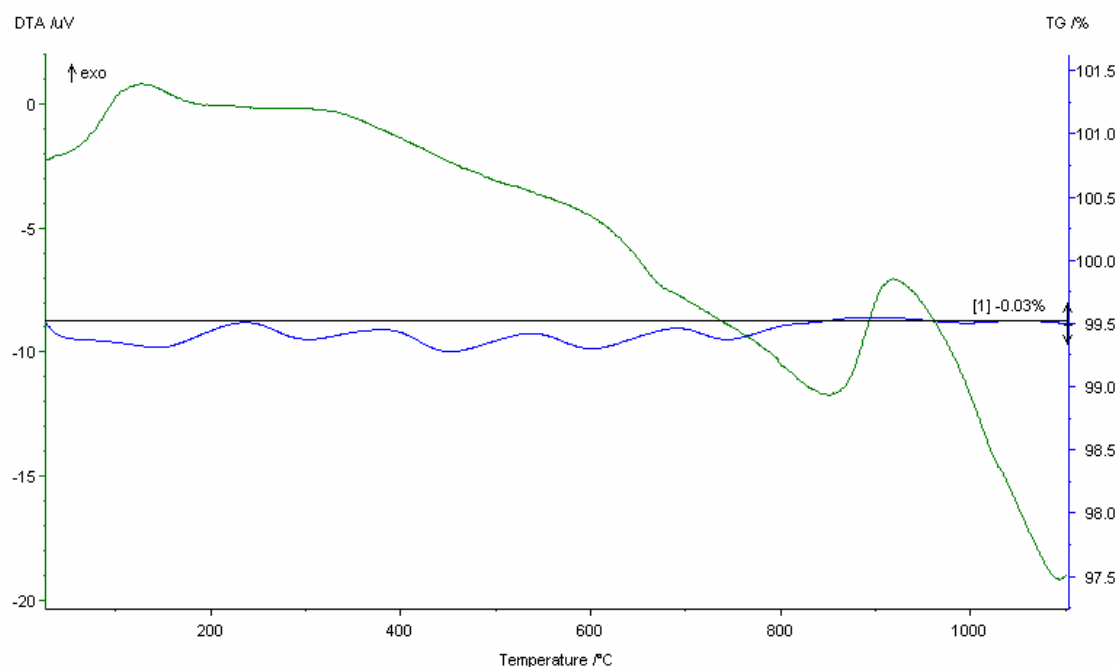


Figura 5.6 Análise Térmica do Resíduo A – Areia do Sistema com 30% em Massa

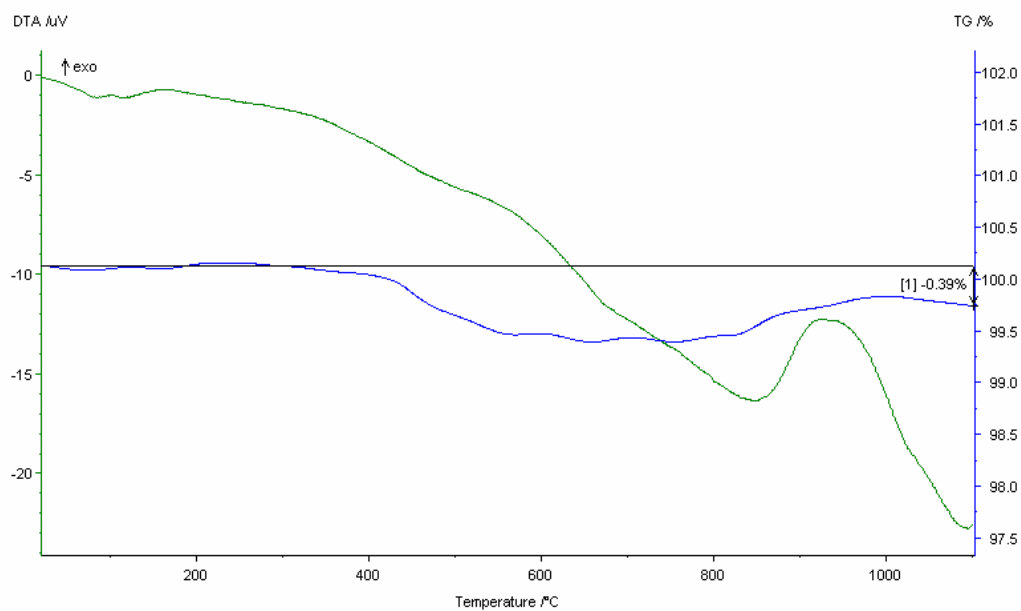


Figura 5.7 Análise Térmica do Resíduo A – Areia do Sistema com 60% em Massa

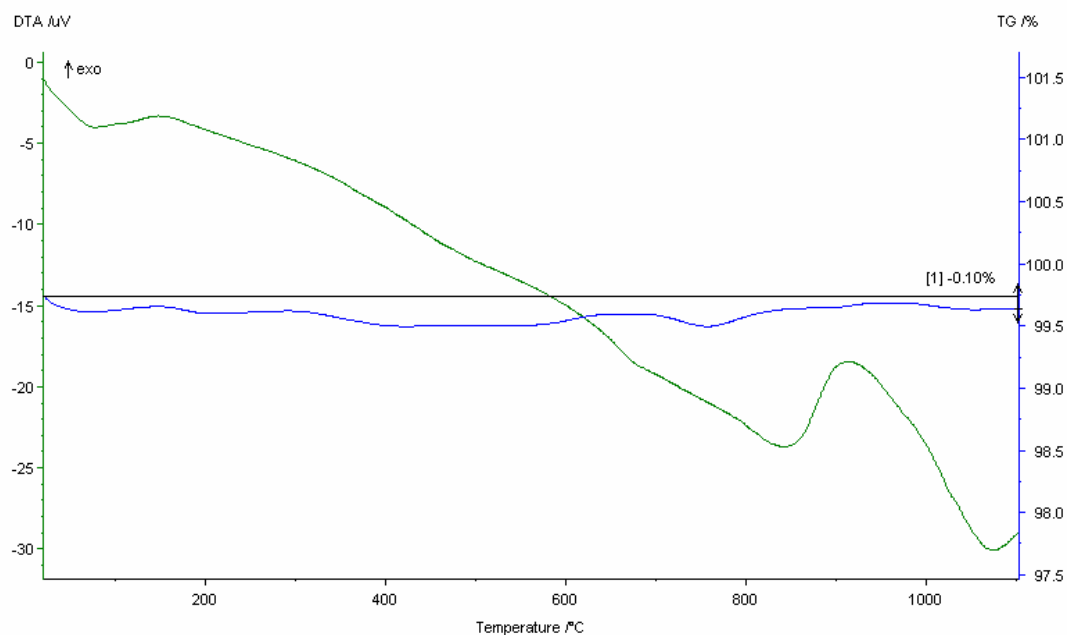


Figura 5.8 Análise Térmica do Resíduo A – Areia do Sistema com 100% em Massa

O comportamento observado para o resíduo B (Figuras 5.9, 5.10 e 5.11) é muito semelhante ao do resíduo A. Para o resíduo B, observa-se que o pico de cristalização torna-

se mais acentuado à medida que o percentual de resíduo é incrementado. Seria necessário uma avaliação das fases formadas por meio da técnica de Difratometria de Raios-X para avaliar as fases formadas. Já com respeito a  $T_m$ , pode-se dizer que a adição do resíduo B não interferiu significativamente neste parâmetro;

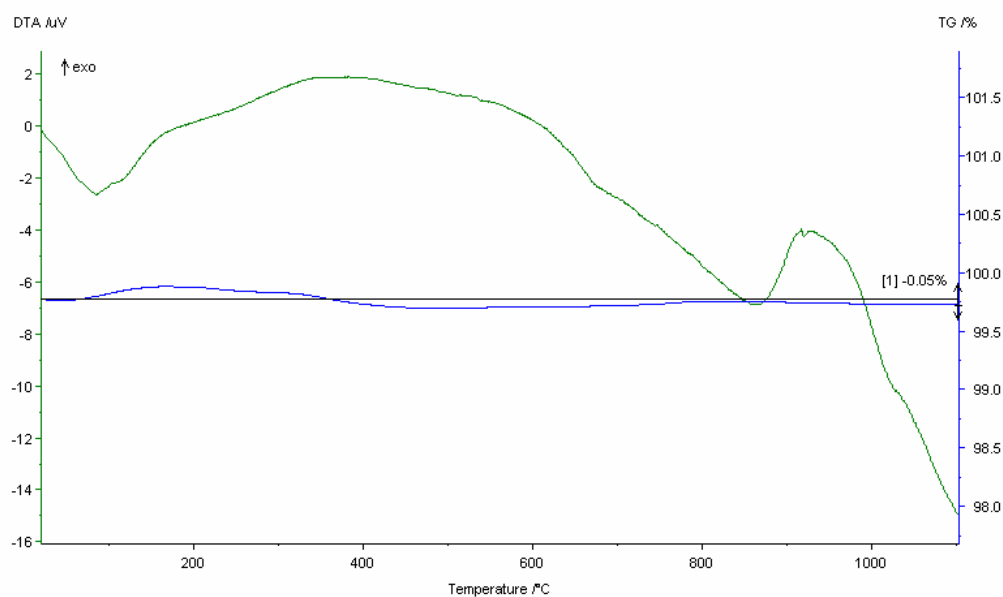


Figura 5.9 Análise Térmica do Resíduo B – Areia do Sistema com 30% em Massa

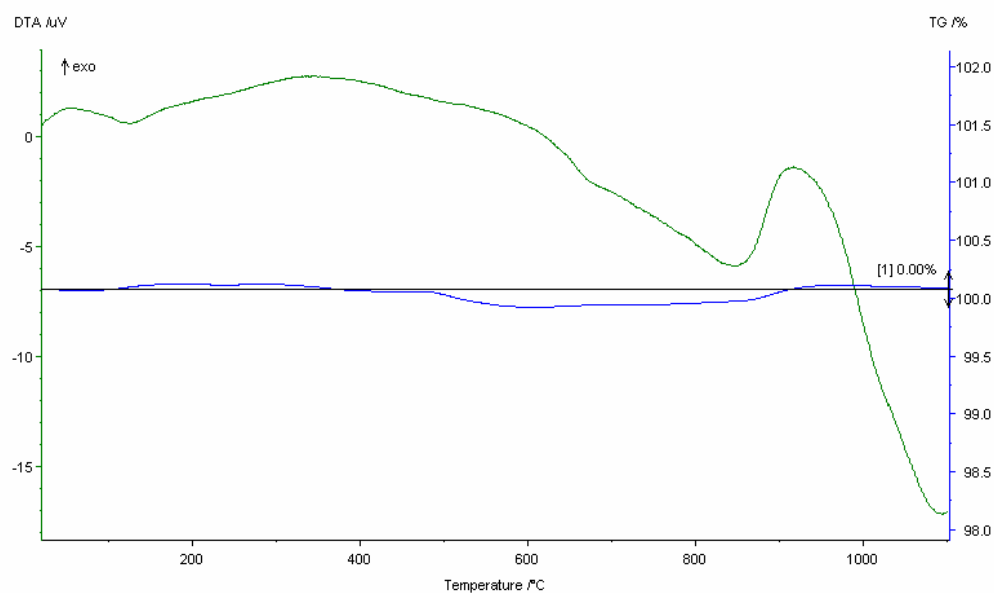


Figura 5.10 Análise Térmica do Resíduo B – Areia do Sistema com 60% em Massa

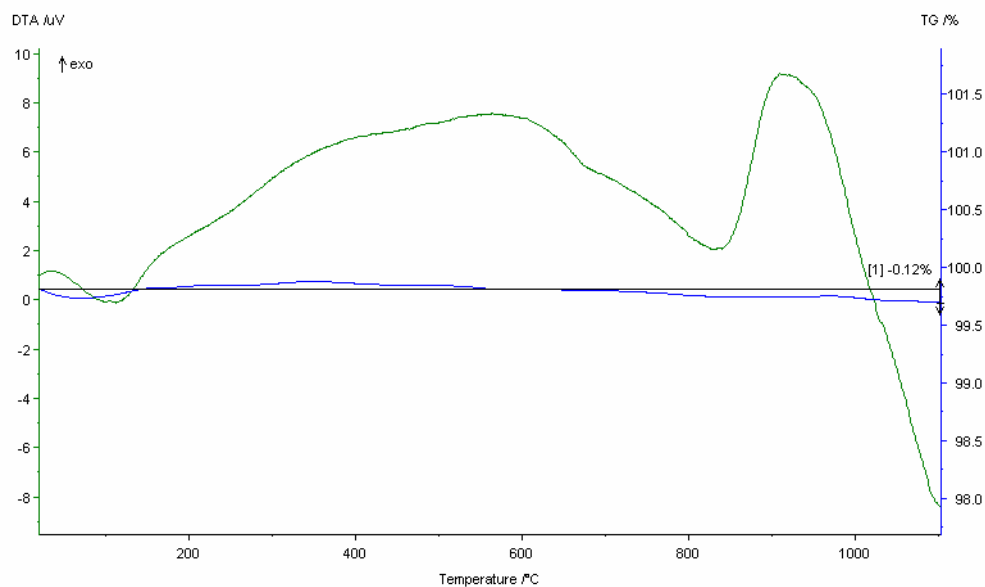


Figura 5.11 Análise Térmica do Resíduo B – Areia do Sistema com 100% em Massa

O comportamento da curva de ATD para o resíduo C (Figuras 5.12, 5.13 e 5.14) é muito semelhante ao dos demais resíduos. As temperaturas  $T_g$  e  $T_c$  praticamente são as mesmas. Entretanto, com respeito a temperatura de fusão, claramente houve uma redução com o aumento do percentual de resíduo adicionado, causado pelos mesmos motivos apresentados para o resíduo A.

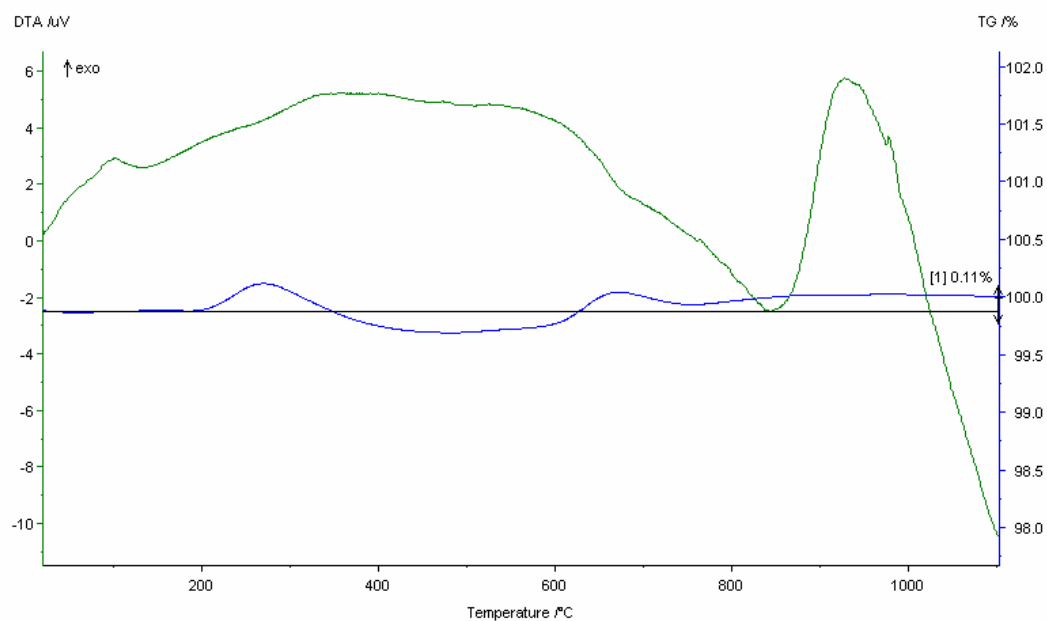


Figura 5.12 Análise Térmica do Resíduo C – Areia do Sistema com 30% em Massa

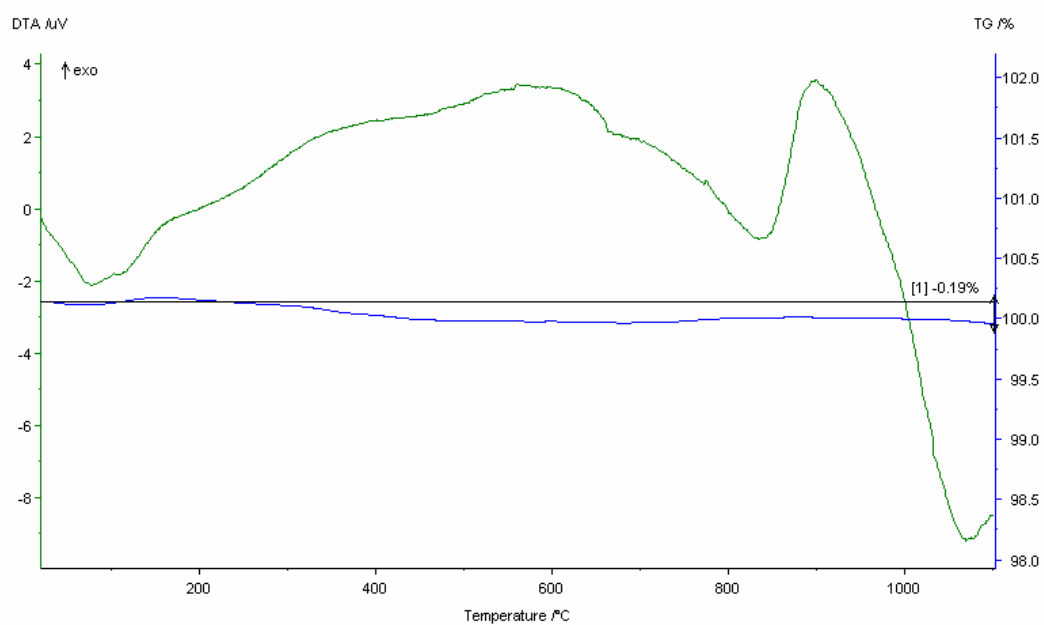


Figura 5.13 Análise Térmica do Resíduo C – Areia do Sistema com 60% em Massa

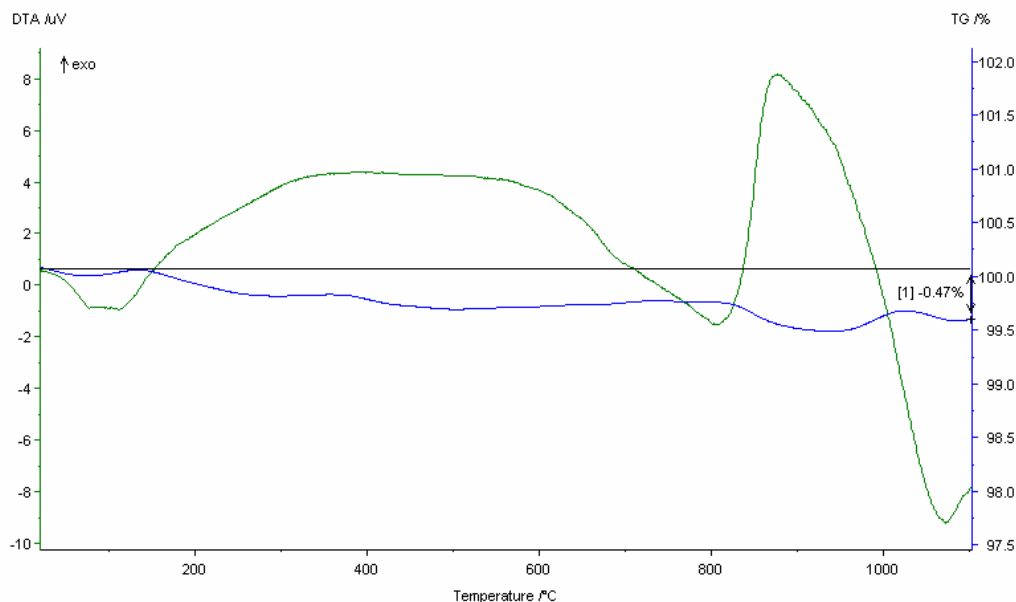


Figura 5.14 Análise Térmica do Resíduo C – Areia do Sistema com 100% em Massa

#### Análise Dilatométrica:

Os resultados da Análise Dilatométrica (AD) obtidos pelo dilatômetro são apresentados na Tabela 5.15, na qual pode-se observar que não houve uma variação significativa nos valores de CET. Este parâmetro é importante na indústria cerâmica, pois o acordo dilatométrico massa/esmalte deve ser respeitado, sob pena de ocorrer problemas de curvatura no material cerâmico sinterizado (empenamento).

Tabela 5.15 Coeficiente de Expansão Térmica das Amostras.

AMOSTRA	CET (25 a 325°C)
Padrão	$6,65.10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
Resíduo A 30%	$6,72.10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
Resíduo A 60%	$6,64.10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
Resíduo A 100%	$6,71.10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
Resíduo B 30%	$6,73.10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
Resíduo B 60%	$6,60.10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
Resíduo B 100%	$6,61.10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
Resíduo C 30%	$6,42.10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
Resíduo C 60%	$6,73.10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
Resíduo C 100%	$6,58.10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$



## 5.5.2 Lixiviação

Os ensaios de lixiviação aplicados aos corpos de prova com resíduo tiveram como objetivo principal verificar a percolação de contaminantes para o meio, comparando-os com corpos de prova sem o resíduo. A Tabela 5.16 apresenta os resultados da lixiviação dos corpos de prova.

Tabela 5.16 Resultados da Lixiviação dos Corpos de Prova em Fritas Cerâmicas.

Parâmetro (mg/l)	Amostra										Comparativos	
	Sem Areia	Areia A			Areia B			Areia C			NBR 10.004	Portaria
	Padrão	5%	10%	20%	5%	10%	20%	5%	10%	20%	Lixiviação	1469 - art.16
Alumínio *	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	NE	0,2
Benzeno *	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	NE	NE
Cálcio	0,539	0,504	0,709	0,455	0,344	0,439	0,824	0,373	0,378	0,379	NE	NE
Cloretos	0,7	1,4	0,7	1,4	0,7	1,4	3,5	1,4	0,7	1,4	NE	250
Cobalto **	0,00005	0,00005	0,00005	0,0007	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0025	NE	NE
Cobre *	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	NE	2
Cromo *	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	5	0,05
Dureza	6	8	6	8	4	8	6	6	4	6	NE	500
Enxofre *	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	NE	NE
Etilbenzeno *	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	NE	0,2
Fenol *	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	NE	NE
Ferro *	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	NE	0,3
Fluoretos	0,431	0,339	0,366	0,351	0,38	0,386	0,452	0,476	0,371	0,34	NE	1,5
Fósforo **	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	NE	NE
Magnésio	0,092	0,097	0,108	0,111	0,077	0,091	0,106	0,086	0,088	0,073	NE	NE
Manganês *	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	NE	0,1
Potássio	0,678	0,316	0,23	1,38	0,252	0,745	1,19	0,369	0,428	0,636	NE	NE
Silício **	1,5	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	NE	NE
Sódio	0,134	0,265	0,207	0,263	0,139	0,18	0,614	0,203	0,199	0,267	NE	200
Sulfato *	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	NE	250
Tensoativos *	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	NE	0,5
Titânio *	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	NE	NE
Tolueno *	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	NE	0,17
Zinco	0,149	0,083	0,091	0,096	0,089	0,085	0,057	0,096	0,055	0,063	NE	5
Zircônio	9,47	9,93	8,59	12,03	8,54	11,22	10,63	13,92	11,18	11,34	NE	NE
Xileno *	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	NE	0,3

\*Valores iguais ao limite de detecção do ensaio /\*\*Menores valores iguais ao limite de detecção do ensaio/ NE – Não Especificado.

Analisando os resultados encontrados para os corpos de prova contendo formulações de resíduos A, do sistema de areia, B, da quebra de canais e C da exaustão, é possível dizer que houve pequena variação em função do corpo de prova padrão, sem resíduo contendo apenas argila. Em geral, sofreram alteração os resultados dos parâmetros sódio, cálcio, cloretos, dureza, fluoretos, magnésio, potássio, zircônio e silício com valores acima e abaixo dos encontrados para o padrão dependendo do tipo de resíduo. Nas amostras formuladas com areia B – pó da exaustão essa diferença demonstrou-se mais acentuada, aumentando a lixiviação com o aumento do percentual adicionado.

O parâmetro zinco encontrou-se abaixo dos resultados verificados para o padrão.

O parâmetros alumínio, cobre, cromo, ferro, manganês, titânio, cobalto não foram encontrados acima dos limites de detecção nas amostras, demonstrando que os

corpos de prova não possuem estes metais acima das concentrações especificadas nas análises. Para o parâmetro cobalto foi encontrado apenas um resultado acima do padrão que foi desconsiderado. Da mesma forma não foram encontrados nas amostras os parâmetros orgânicos de benzeno, etilbenzeno, tolueno, xileno e fenol também analisados. Além disso os resultados para enxofre, fósforo ,sulfato, e tensoativos também não foram encontrados acima dos limites de detecção.

## Discussão

Verificando a qualidade das amostras é possível dizer que o aumento de espécies químicas presentes na formulação do material, alterou significativamente sua funcionalidade, mesmo não sendo significativa sua lixiviação, de acordo com os ensaios efetuados. Desta forma, os percentuais utilizados dos resíduos para incorporação em fritas cerâmicas transparentes poderiam ser revistos para quantidades abaixo de 30% em massa do total de areia de fundição de modo a não prejudicar sua funcionalidade. Além disso, poderia ser verificada sua utilização em fritas cerâmicas opacas, como aditivo.

Adicionalmente, comparando-se os resultados encontrados nos lixiviados das amostras com os padrões de potabilidade de água para o consumo humano, conforme decreto n.º 1.469 ,de 29/12/00, as fritas cerâmicas formuladas com resíduos de fundição não apresentam potencial de contaminação pois não foram encontrados contaminantes nos lixiviados analisados em concentrações acima ou próximas das estabelecidas pela referida legislação.

Em conclusão, o estudo da Aplicação dos Resíduos de Fundição em Massa Asfáltica, Cerâmica Vermelha e Fritas Cerâmicas, forneceu os seguintes resultados:

1. Os resíduos adequaram-se aos procedimentos usuais de fabricação de massa asfáltica, cerâmica vermelha e fritas cerâmicas, podendo-se avaliar sua condição de uso nestes processos;
2. É possível utilizar os resíduos de fundição, Areia A (sistema), Areia B (quebra de canais e Areia C (Pó de Exaustão) como matéria-prima/insumo nas formulações de massa asfáltica e cerâmica vermelha com concentrações de 10% em massa sem comprometer a qualidade estrutural e funcional dos produtos;
3. A utilização dos resíduos, Areia A (sistema), Areia B (quebra de canais) ou Areia C (Pó de Exaustão) como matéria-prima/insumo nas formulações de fritas cerâmicas não se demonstrou adequada nas concentrações testadas (30, 60 e

100% em massa) para sua aplicação em fritas transparentes. Contudo, podem ser estudados percentuais menores para formulação de fritas transparentes ou testar a aplicação dos resíduos em fritas opacas.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta pesquisa buscou fornecer subsídios para uma fundição de ferro fundido avaliando tecnicamente a aplicação de seus resíduos de areia de moldagem ou areia a verde como matérias primas/insumos na fabricação de massa asfáltica (tipo CBUQ), cerâmica vermelha e fritas cerâmicas.

Verificou-se que é possível utilizar o resíduo de areia de fundição em concentrações de 2,5; 5,0; 7,5; e 10 % em massa na massa asfáltica sem comprometer as qualidades funcionais do produto. Além do mais, a adição dos resíduos de fundição na massa asfáltica não afetou adversamente o meio ambiente, considerando os atuais padrões de comparação: a potabilidade de águas para consumo e lixiviação de resíduos.

Com relação aos resultados com cerâmica vermelha, verificou-se uma melhoria das propriedades do produto final nas concentrações testadas de 5 e 10% em massa de resíduos sobre a massa total. Na concentração testada com 20% de resíduos de fundição em massa houve uma redução na resistência mecânica, contudo, ainda admissível. De forma geral, os resultados indicaram que é possível utilizar a areia de fundição como um aditivo em cerâmica vermelha, sem prejudicar a qualidade do produto final. Comparativamente a aplicação em massa asfáltica, mesmo que se para alguns elementos houve uma lixiviação maior em relação ao corpo de prova sem resíduos, a adição de resíduos de areia de fundição não ultrapassou os padrões ambientais ficando abaixo dos limites.

Quanto à aplicação em fritas cerâmicas, observou-se um comportamento diferenciado das fritas sem e com resíduos. Nas concentrações testadas, 30, 60 e 100% em massa sobre a massa total, constatou-se que houve alteração da qualidade do produto final, demonstrando-se um material com maior opacidade e menor fusibilidade, significando que sua aplicação poderia ser estudada para fritas cerâmicas opacas e não transparentes. Quanto à lixiviação dos corpos de prova, também não foram detectados problemas com relação aos padrões ambientais usados neste estudo.

Assim é possível dizer que sob o ponto de vista técnico os resíduos de areia de moldagem de fundição de ferro fundido podem ser reutilizados diretamente em massa asfáltica (tipo CBUQ) e cerâmica vermelha, sem comprometer a qualidade final do produto e

sem provocar alterações negativas no meio ambiente como ocasionar índices além do permitido pelos requisitos legais de substâncias com caráter poluente.

Desta forma o reuso ou a valorização dos resíduos dependerá em uma segunda fase de uma análise econômica da atividade em estudo, na qual deverá ser considerado o custo de disposição, o transporte e a extração de matérias-primas para os processos em que se pretende fazer o reuso. Além disso, devem ser considerados os processos de licenciamento ambiental da atividade de reuso, tanto no gerador como no consumidor do resíduo.

Considerando a aplicação em massa asfáltica, tem-se que, na região de Joinville-SC, o custo da extração de matéria-prima encontra-se na faixa de R\$ 8,00 a 10,00 por tonelada. No caso de uma usina de asfalto que produz em média 550 toneladas de asfalto por dia, a quantidade a ser utilizada de areia seria cerca de 55 toneladas/dia ou uma redução de 10 % no custo de extração da matéria prima ou R\$ 550,00/dia se o resíduo for simplesmente doado. Neste caso, o reuso dependerá da quantidade consumida pela usina contra a geração de resíduos pela fundição e da distância existente entre a fundição e a produção do asfalto. Para uma venda destes resíduos seria necessário um acordo entre as partes considerando os custos envolvidos.

Para a aplicação em cerâmica vermelha tem-se na região de Joinville que a extração de argila pode representar de 10 até 50% do custo de produção, dependendo se a cerâmica possui equipamentos necessários para extração ou se é feito mediante aluguel. Logo, no valor de produção de um milheiro de tijolo (quantidade utilizada pelos ceramistas para venda do produto), pode-se chegar a uma redução de até 50%, dependendo da localidade, estrutura e quantidade produzida.

Na aplicação de fritas cerâmicas, o custo da matéria prima é de cerca de R\$190,00 por tonelada. Para o reuso de resíduos de fundição, além de rever o tipo de frita a ser incorporado o resíduo e sua concentração, será preciso considerar o transporte até o consumidor, que neste caso pode chegar a 400km [ Joinville (gerador) e Criciúma (produtor de fritas)] e também onerar o reuso.

Finalmente, a questão da reutilização de resíduos deve contemplar, além de um estudo técnico, a viabilidade de implementar o negócio, considerando que esta análise econômica será individualizada por gerador, sendo imprescindível a participação de órgãos ambientais na regularização da atividade. Contudo, deve-se considerar que torna-se cada vez mais inadmissível gerar áreas de aterro, improdutivas e que impactam o meio ambiente,

quando é possível criar novas oportunidades de mercado e preservar a natureza e os recursos naturais.

Mediante o exposto, as recomendações deste trabalho incluem a continuidade aos estudos de valorização de resíduos, com o objetivo de implementá-los, considerando que esta atividade já é homologada em outros países. Mais especificadamente, pode-se citar:

- Avaliação da quantidade ideal de betume nas massas asfálticas com resíduos de fundição;
- Avaliação da utilização de concentração de 15% em peso de resíduos para cerâmicas vermelhas;
- Avaliação da utilização de resíduos de areia em fritas cerâmicas opacas ou mates e em fritas transparentes com menores percentuais em massa;
- Execução de ensaio piloto com acompanhamento dos órgãos governamentais de interesse e participação de usinas de asfalto ou olarias de modo a implementar e valorizar os resíduos.
- Execução de diagnóstico ambiental voltado ao setor de fundição de ferro no Brasil, visando estabelecer o panorama atual desta atividade quanto à geração, tratamento, reutilização e disposição de seus resíduos.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABICHOU, T.; BENSON, C.H.; TUNCER, B. E.; BRIAN, W.F. Using waste foundry sand for hydraulic barriers. Recycled Materials in Geotechnical Applications. In:GeoCongress, 1998, Boston, **Anais eletrônicos**. Madison, Dept.of Civil and Environmental Engineering - University of Wisconsin. Disponível em: <<http://www.foundryrecycling.org/ID3abstract.html>> Acesso em: 18/02/2003.
2. AMERICAN FOUNDRYMEN'S SOCIETY, INC. **Foundry sand beneficial reuse manual**: special report. Illinois: Department of Commerce and Community Affair, 1996.
3. \_\_\_\_\_. **Foundry sand: material description**. Disponível em: <<http://www.rmrc.unh.edu/Partners/UserGuide/fs1.htm>> Acesso em: 13/08/2003.
4. \_\_\_\_\_. **Final (phase II) report an alternate utilization of foundry sand waste sand**. Illinois: 55p., 1992.
5. ALBARÓ, J. L. A. Vidrados para pavimentos e revestimentos cerâmicos: evolução e perspectivas. Part II. **Cerâmica Industrial**, v6(6), p. 41-50, 2001.
6. ALVES,W. A.; BALDO, J. B. O potencial de utilização de um resíduo argiloso na fabricação de revestimento cerâmico. Parte I – Caracterização. **Cerâmica Industrial**, v. 2(5/6), p. 38-40, 1997.
7. ANUÁRIO BRASILEIRO DE CERÂMICA: **Panoramas setoriais. fritas, vidrados, pigmentos e corantes**: A falta de um design nacional. p.91-92, 1989.
8. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO**. Pesquisa efetuada no site. Disponível em < <http://www.abifa.org.br/>>. Acesso em: 10/06/2004.
9. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS. Metalurgia e desenvolvimento**: a corrida dos metais no Brasil. São Paulo: ABM, 1989.
10. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS**. Pesquisa efetuada no site. Disponível em < <http://www.abmbrasil.com.br/>>. Acesso em: 10/06/2004.

11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Lixiviação de resíduos – procedimento:** NBR 10.005. Rio de Janeiro:1987.
12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Amostragem de resíduos – procedimento:** NBR 10.007. Rio de Janeiro:1987.
13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos Sólidos – classificação:** NBR 10.004. Rio de Janeiro:1987.
14. BASTIAN, K. C.; ALLEMAN J.E. Microtox characterization of foundry sand residuals. **Waste Management**, n. 18 p. 227-234, 1998.
15. BASTOS, F. A. **Avaliação do processo de fabricação de telhas e blocos cerâmicos visando a certificação do produto.** Florianópolis, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.
16. BOYLE, W.; HAM R. Research reveals characteristics of ferrous foundry wastes. **Modern Casting**, p. 37-41, Feb, 1990.
17. \_\_\_\_ HAM R.; ENGROFF E.; FERRO R. Determining the presence of organic compounds in foundry waste leachate. **Modern Casting**, p. 27-31, July, 1989.
18. BIOLO, S.M. **Utilização da areia de fundição na fabricação de blocos cerâmicos.** Passo Fundo, 2001. TCC (Trabalho de Conclusão do Curso de Especialista em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura/Universidade de Passo Fundo/RS.
19. \_\_\_\_\_. Utilização da areia de fundição na fabricação de blocos cerâmicos. **Revista Fundição & Matérias Primas**, p. 54-59, Mai/Jun, 2003.
20. BITENCOURT, E. R.; GEMELLI, E. Utilização de matéria prima alternativa na fabricação de tijolos cerâmicos. In: Congresso em Ciência de Materiais do Mercosul, 2002, Joinville. **Anais.** Joinville: Tec Art Editora Ltda, 2002.



21. BODET, R.; STEPHAN, J.; ROUGEAU, P.; DUTRUEL, F. Industrial demonstration operation on the reuse of foundry sand in the concrete blocks. **Stab & Env.**, pg 320-328, 1999.
22. BONET, I.I. **Valorização do resíduo de areia de fundição (R.A.F.): incorporação nas massas asfálticas do Tipo C.B.U.Q.** Florianópolis, 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina.
23. \_\_\_\_\_. Valorização do resíduo de areia de fundição (R.A.F.): incorporação nas massas asfálticas do tipo C.B.U.Q (concreto betuminoso usinado a quente). In: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2003, Joinville. **Anais.** Joinville: Micro Service, 2003.
24. BUSTAMANTE, G. M.; BRESSIANI, J. C. A Indústria cerâmica brasileira. **Cerâmica Industrial**, v. 5(3), p. 31-36, 2000.
25. CAMPOS FILHO, M. P. de. **Solidificação e fundição de metais e suas ligas.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1978.
26. COSTA, M. G.; RIBEIRO, M. J.; LABRINCHA, J. A. Reutilização in situ das lamas residuais de uma indústria cerâmica. **Cerâmica Industrial**, v. 7(5), p. 44-50, 2002.
27. CLEAN WASHINGTON CENTER'S. **Recycling technology assistance partnership.** Washington, CWC, 1996. (Fact Sheet)
28. ECKSTEIN, J. Reuse of foundry sand in road construction. In: International Conference: Foundry waste possibilities in the future, San Sebastian, 2001. **Anais.** San Sebastian, Spain: 2001.
29. ERIKSSON, K. Environmental aspects from a foundry perspective. In: International Conference: Foundry waste possibilities in the future, San Sebastian, 2001. **Anais.** San Sebastian, Spain: 2001.
30. FELICIANO, V.M. J.; CASTRO, L. F.A.; RIBEIRO, E. D. L.; LEÃO, M. M. D.; SOUZA, C.M.; GOMES, A. M. ; ALMEIDA, M.L.B.; LOPES, L.E.F. **Controle ambiental das**

- indústrias de ferro-gusa em altos-fornos a carvão vegetal.** Belo Horizonte: Segrac Editora e Gráfica Ltda, 2002, 302 p.
31. GLIELISSEN, H. An Overview of 10 yers foundry experience with greensand reclamation  
In: International Conference: Foundry waste possibilities in the future, San Sebastian, 2001. **Anais.** San Sebastian, Spain: 2001.
  32. GORBEA, I.S. Activities carried out in spain with reference to the environment and foundries. In: International Conference: Foundry waste possibilities in the future, San Sebastian, 2001. **Anais.** San Sebastian, Spain: 2001.
  33. HERAS, F. M. A Evolução das fábricas de fritas, esmaltes e corantes cerâmicos e sua contribuição para o setor cerâmico. **Cerâmica Industrial**, v. 7 (4), p. 7-17, 2002.
  34. IRABIEN, J. A.; ANDRÉS, A. Solifification/stabilization process for steel foundry dust using cement based binders: influence of processing variables. **Waste Management & Research**, p. 405-415, v.12, 1994.
  35. INDIANA DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT. Office of Solid and Hazardous Waste Management. **Foundry sand use.** Indianapolis, 1998.
  36. JAVED, S.; LOVELL, C.; WOOD, L. Waste foundry sand in asphalt concrete. **Transportation Research**, v. STP1437, p. 27-34, 1994.
  37. KONDIC, Voya. **Princípios metalúrgicos de fundição.** São Paulo: ed. Polígono, 1973.
  38. LEGISLAÇÃO AMBIENTAL BRASILEIRA. In: SISLEG – GB Consultoria. **Bancos de Dados de Legislação Ambiental:** desde 2002. Disponível em: <[www.sisleg.com.br](http://www.sisleg.com.br)> (acesso restrito a usuários cadastrados) Acesso em: 10/06/04.
  39. LEIDEL, D.S. Sand reuse : user requirements, **Modern Casting**, v.83, p.38-39, 1993.
  40. MARIOTTO, L. C. Regeneração de Excedentes de Areias de Fundição. In: SEMINÁRIO LATINO- AMERICANO DE FUNDIÇÃO, Belo Horizonte, 2001, **Anais.** Belo Horizonte: 2001.

41. \_\_\_\_\_. Regeneração de areias: uma tentativa de discussão sistemática. **Fundição e Matérias-Primas**, v.33, n. 42, 2000.
42. MODESTO, C.; BRISTOTA, V.; MENEGALI, G.; BRIDA, M. DE; MAZZUCCO, M.; MAZON, A.; BORBA, G.; VIRTUOSO, J.; GASTALDON, M.; NOVAES DE OLIVEIRA, A.P. Obtenção e caracterização de materiais cerâmicos a partir de resíduos sólidos industriais. **Cerâmica Industrial**, v. 8(40), p. 14-18, 2003.
43. MONTEDO, O.R.K.; REITZA, G.M.; BERTANA, F.M.; PICCOLIA, R.,; HOTZAB,N D.; NOVAES DE OLIVEIRA, A.P. Utilização de pó de aciaria em massa cerâmica vermelha. **Cerâmica Industrial**, v. 8(5/6) p. 14-17, 2003.
44. MOSHER, G. Reuse of foundry waste in USA. In: International Conference: Foundry waste possibilities in the future, San Sebastian, 2001, **Anais**. San Sebastian, Spain: 2001.
45. MATOS, S. V. Alternativa s de minimização de resíduos da indústria de fundição. In: 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1997, Foz do Iguaçu. **Anais**. Foz do Iguaçu: 1997.
46. MOTTA, J. F. M.; ZANARDO, A.; CABRAL JÚNIOR, M. As Matérias-primas cerâmicas. parte I: O perfil das principais indústrias cerâmicas e seus produtos. **Cerâmica Industrial**, v. 6(2), p.28-39, 2001.
47. NAYSTRÖN, P. Use of bentonite bonded foundry sand and slag from cupola furnaces in landfill construction. In: International Conference: Foundry waste possibilities in the future, San Sebastian, 2001. **Anais**. San Sebastian, Spain: 2001.
48. NÚÑEZ, W. P.; LEYEN, G.W.W.; BREHM, F.; GRAFFITTI, D.; PICCININI, P.R.; MORAES, C. A. M. Utilização de areia usada de fundição como matéria-prima de mistura asfáltica. In: Congresso Nacional de Fundição, 2003, São Paulo. **Anais**. São Paulo: 2003.

49. OLIVEIRA, T. M. N. de. **Eco-estratégia empresarial no setor metal-mecânico da escola técnica Tupy**. Florianópolis, 1998. Tese (Doutorado em Engenharia da Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina.
50. ORKAS, J. Beneficial reuse of foundry surplus sands and the composting process. In: International Conference: Foundry waste possibilities in the future, San Sebastian, 2001. **Anais**. San Sebastian, Spain: 2001.
51. PERINI, Paulo Roberto. Fundição. Apostila do Curso Técnico Mecânico. Escola Técnica Federal de Santa Catarina:1986.
52. PEREIRA, R.L.; SCHMIDT, A.E.; ALMEIDA, N.H.C.; VERRAN, G.O. Parte I: Utilização de resíduo de areia verde de fundição na preparação de argamassa para aplicação na construção civil. In: Congresso em Ciência de Materiais, 2000, Joinville. **Anais**. Joinville: 2000.
53. PORTO ROSSI, M. A. **Esmaltes e Vidrados**. Disponível em: <<http://www.portorossi.art.br>> Acesso em: 10/02/2003.
54. PRACIDELLI, S.; MELCHIADES, F.G. Importância da composição granulométrica de massas para cerâmica vermelha. **Cerâmica Industrial**, v. 02 (01/02), p. 31-35, 1997.
55. REGAN, R. W.; HEANEY, M.; DUNKELBERGER. Weighing sand reuse options from customer's perspective. **Modern Casting**, pg 45-47, August, 1997.
56. RIVE, L. D. Wet Sand Reclamation Central Plant Experience in Italy. In: International Conference: Foundry waste possibilities in the future, San Sebastian, 2001. **Anais**. San Sebastian, Spain: 2001.
57. SMITH, J.D. Foundry waste research: A model for industry. **Modern Casting**, p. 24-27, February, 1991.
58. SMITH, M.; KUNES T. Waste disposal considerations for green sand use in the foundry industry. AFS-CMI Conference on Green Sand-Productivity for 80's. 1983, Wisconsin. **Anais**. Wisconsin :1983.

59. SMITH, E.; KUNES T; STEPHENS W. Making your foundry's waste work for you: constructive use and reclamation. **Modern Casting**, pg 43-45, May, 1982.
60. SKVÁRA, F.; KASTÁNEK F.; PAVELKOVÁ I.; SOLCOVÁ O.; MALETEROVÁ Y.; SCHNEIDER P.. Solidification of waste steel foundry dust with portland cement. **Journal of Hazardous Materials**, B89, p. 67-81, 2002.
61. SALAMZADEK, E. **The study of two laboratory leaching tests on foundry solid wastes**. Wisconsin, 1985. Report of Master Science (Department of Civil and Environmental Engineering) – University of Wisconsin Madison.
62. SÁNCHEZ, E. Matérias-primas para a fabricação de fritas e esmaltes cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, v. 2 (3/4), p. 32-40, 1997.
63. WALDEN, W. **Alternate use of sand**. Technikon LCC, Mc Clellan, CA, 2003.
64. WATANABE, F. A.; GEMELLI, E.; FOLGUERAS, M.V. Utilização de areia de fundição como agregado na confecção de pavimentos de concreto, parte I: Propriedades mecânicas e microestruturais do concreto. In: Congresso em Ciência de Materiais do Mercosul, 2002, Joinville. **Anais**. Joinville: 2002.
65. WINKLER, E. S.; BOL'SHAKOV, A. A. **Characterization of foundry sand waste**. Massachusetts: Chelsea Center for Recycling and Economic Development, 82 p., October, 2000. (Technical Report number 8).
66. \_\_\_\_; KOSANOVIC, B.; GENOVESE, T.; ROTH, I. **A Survey of foundry participation in the Massachusetts**: beneficial use determination process. Massachusetts: Chelsea Center for Recycling and Economic Development, 59 p. March, 1999. (Technical Report number 31).
67. WRIGHT, J. R. Take a new look at sand reclamation. **Foundry Management & Technology**, p. 22, March, 2001.
68. VISENTINI, C.; INGLESE, G.; GORIA, C.A.; SERRAMOGLIA, G. Teksid's contribution to optimizing energy consumption and waste minimization in the iron foundry process. In:

International Conference: Foundry waste possibilities in the future, San Sebastian, 2001.

**Anais.** San Sebastian, Spain: 2001.

69. VIEIRA, C. M. F.; FEITOSA, H. S.; MONTEIRO, S. N. Avaliação da secagem de cerâmica vermelha através da curva de bigot. **Cerâmica Industrial**, v. 8 (1), p. 42-46, 2003.
70. \_\_\_\_\_.; SOARES, T. M.; \_\_\_\_\_. Utilização de granito em massa cerâmica para telhas. **Cerâmica Industrial**, v. 9 (1), p. 28-32, 2004.
71. VIPULANANDAN, C.; WANG, SY. **Foundry sand for highway applications**. Department of Civil and Environmental Engineering. University of Houston, 1998. Disponível em: < <http://cigmat.cive.uh.edu> > Acesso em: 09/02/2004.
72. \_\_\_\_\_.C. **Use of foundry sand in transportation application**. Departament of Civil and Environmental Engineering. University of Houston, [1998?]. Disponível em: < <http://cigmat.cive.uh.edu> > Acesso em 20/02/2003.

# ANEXOS

## ANEXO A – PARCIAL DO RELATÓRIO ANUAL DE ATIVIDADES DO IBAMA – SCHULZ S.A.

Página da W		1 de 3	
	<b>Ministério do Meio Ambiente</b> Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis		
<b>Resumo Relatório Ambiental 2004/2003</b> SCHULZ S/A			
<b>Licenças Ambientais</b>			
<b>Número da Licença</b> 305/2002	<b>Expedidor da Licença</b> SC-FUNDAÇÃO DE MEIO AMBIENTE	<b>Data de Emissão</b> 13/09/2002	<b>Data de Validade</b> 13/09/2003
<b>Produtos e Subprodutos Industriais</b>			
<b>Nome do Produto</b>	<b>Quantidade produzido por ano</b>	<b>Capacidade Instalada</b>	<b>Unidade de Medida</b>
Compressores	214000	250000	Pça
Fundidos	32000	34000	Ton. por ano
Usinados	82010	98412	Pça

## ANEXO B – PARCIAL DO RELATÓRIO DE AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL DO DEPÓSITO DE RESÍDUOS – SCHULZ S.A.



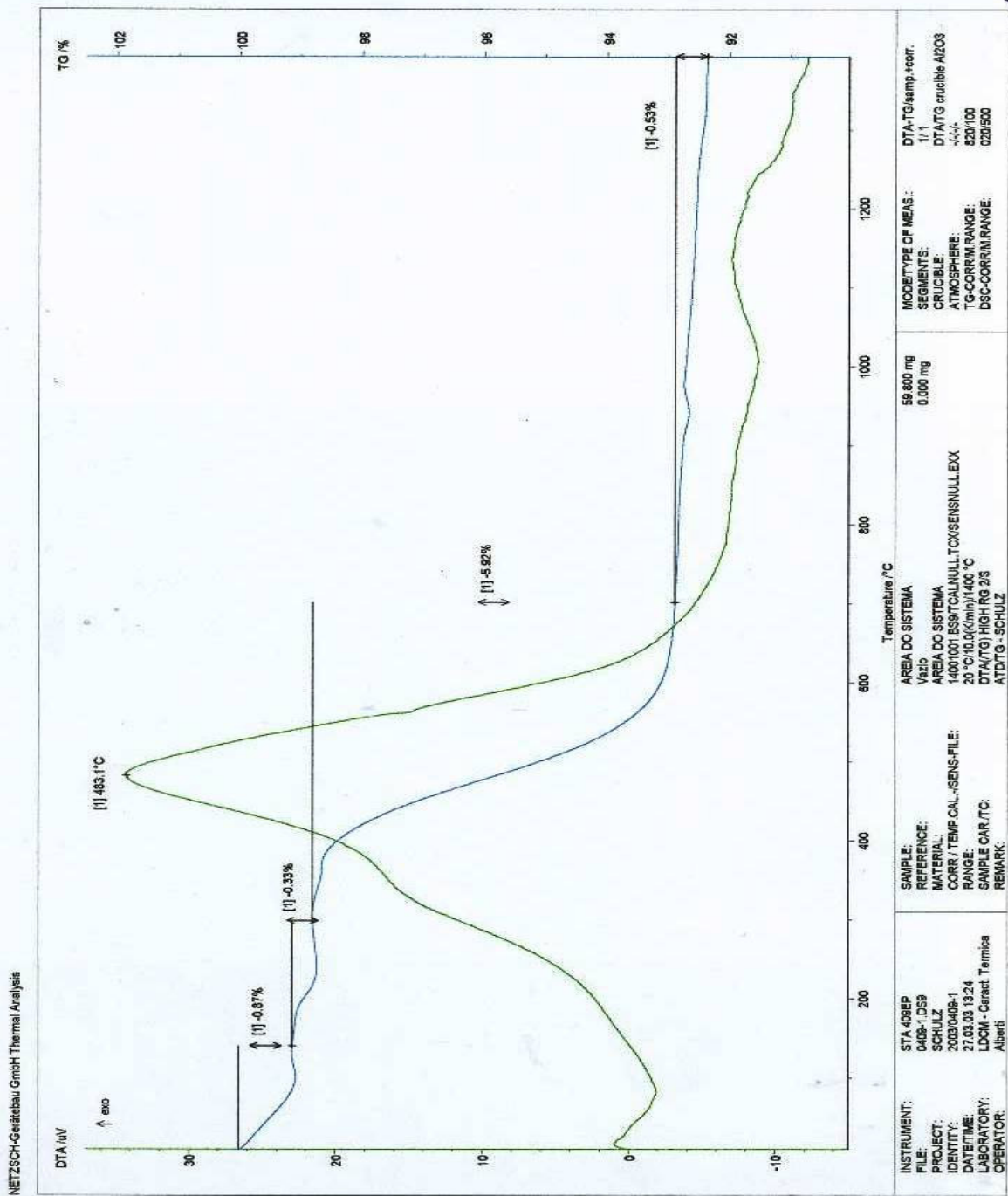
### 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nas informações obtidas nos trabalhos de campo e nos resultados analíticos, pode-se destacar que:

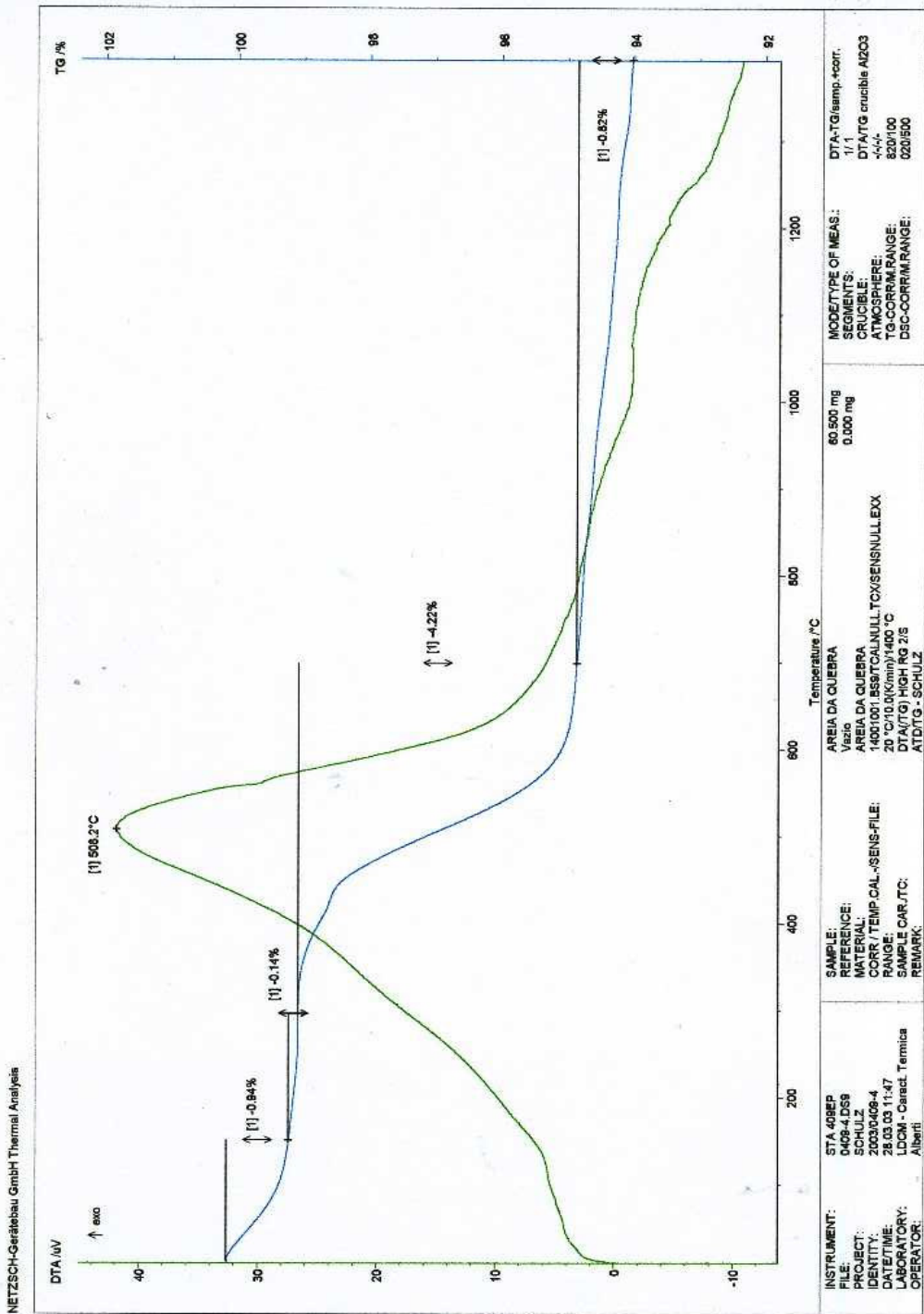
- As sondagens executadas revelaram que a **espessura do aterro** de areia de fundição é de cerca de 15 m na porção superior do depósito (S-01) e cerca de 6 m na porção inferior (S-02 e S-03);
- Os resultados analíticos das **amostras de solo** revelaram concentrações de VOC's e Fenóis inferiores aos valores de intervenção da Lista Holandesa e aos valores orientadores da CETESB para uso industrial. Tal fato atesta que o material depositado não ocasionou alterações de qualidade;
- O aquífero local possui caráter livre, é composto principalmente por solo silto-argiloso marrom amarelado a cinza esverdeado e apresenta uma condutividade hidráulica média de cerca de  $1,7 \times 10^{-5}$  cm/s. As águas subterrâneas apresentam sentido de fluxo para sul / sudoeste, com uma **velocidade** de deslocamento estimada em **0,8 m/ano**;
- Nas águas subterrâneas e superficiais, todos os parâmetros analisados se encontram de acordo com os padrões de qualidade, exceto o Fe e o Mn. Estes elementos, muito abundantes na crosta terrestre, não são considerados tóxicos a seres humanos e seus padrões de qualidade são devidos à questões estéticas (e operacionais (precipitações em sistemas de distribuição);
- Entretanto, a uniformidade dos valores detectados e sua ampla distribuição nas amostras de águas subterrâneas e águas superficiais, podem indicar que estas concentrações correspondam ao valor de *background* do aquífero e das águas superficiais da região;
- As amostras dos **materiais depositados** foram classificadas como **CLASSE II – Não Inerte**;
- Dos pontos de vista geotécnico e ambiental, considera-se que a implantação de medidas de adequação e expansão do atual depósito de areias de fundição é viável, sendo possível recuperar a área degradada, eliminar o passivo ambiental e transformá-lo em um aterro controlado, conforme as normas vigentes (NBR 13.896);
- As atuais pilhas de resíduos estão próximas do seu limite de estabilidade podendo ocasionar rupturas na camada de argila orgânica.



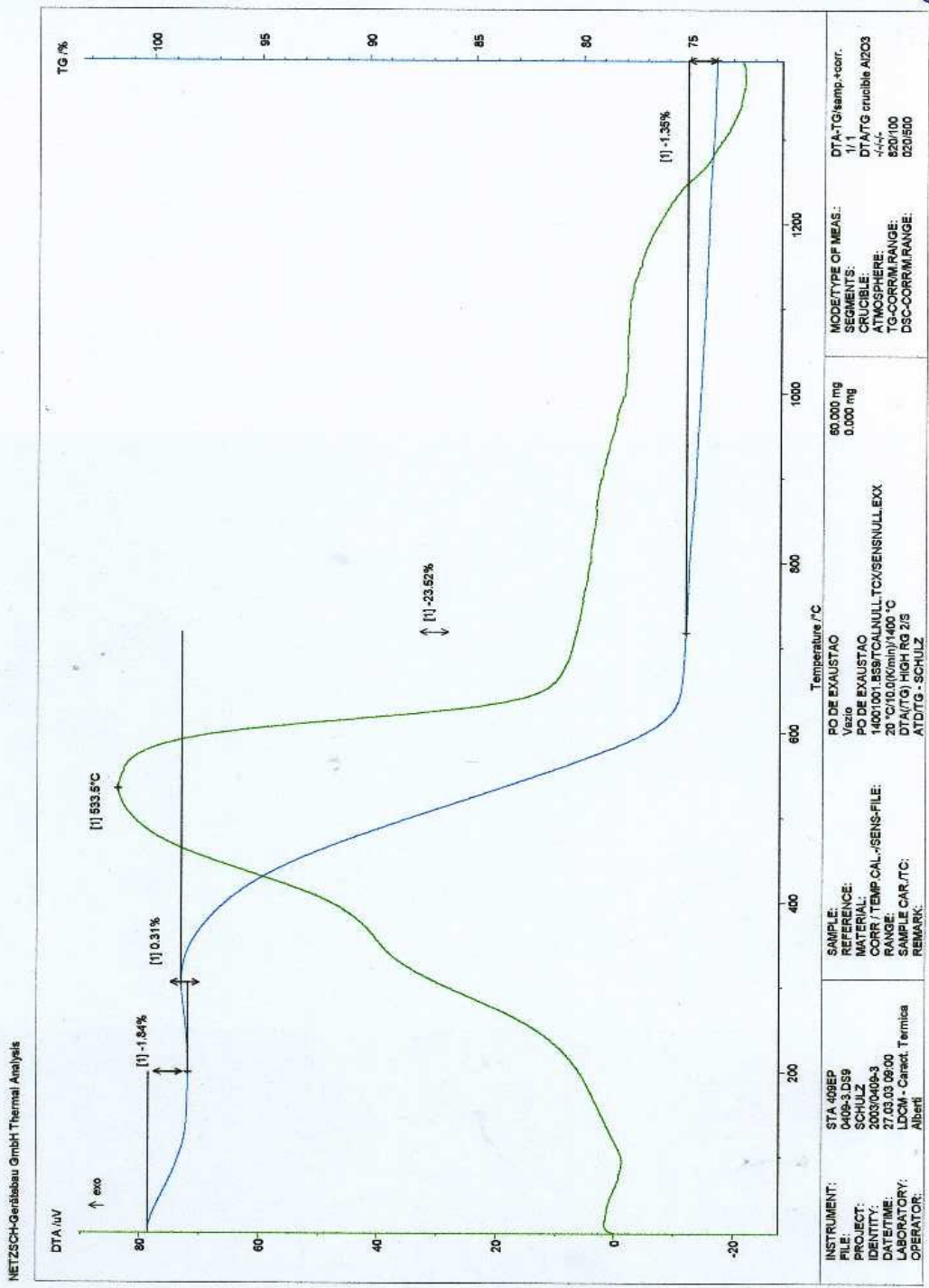
ANEXO C – ATD/ATG AREIA A (SISTEMA)



ANEXO D – ATD/ATG AREIA B (QUEBRA DE CANAIS)



ANEXO E – ATD/ATG AREIA C (PÓ EXAUSTÃO)



## ANEXO F – Densidades Aparentes, Fluência e Estabilidade dos Corpos de Prova.

### DETERMINAÇÃO DAS DENSIDADES APARENTES DAS MISTURAS, FLUÊNCIA E ESTABILIDADE

IDENTIF. CORPO PROVA	%BETUM E	PESO AO AR	PESO OF IMERSO	VOLUME Q <sup>3</sup>	DENSIDADE APARENTE	FLUÊNCIA (0,01")				ESTABILIDADE (kg)		
						LEITURA (0,01mm)		TOTAL (F-I)	VALOR DET.	LIDA	CALCULADA	FATOR CORREÇÃO
						INICIAL	FINAL					
A1	6,0	1.253,60	750,0	503,6	2,489	25	370	345	13,58	360	1.063,08	1,03
A4	6,0	1.260,00	756,3	503,7	2,501	50	390	340	13,39	360	1.063,55	1,03
A5	6,0	1.247,80	746,9	500,9	2,491	46	360	314	12,36	365	1.136,91	1,04
A8	6,0	1.251,90	750,2	501,7	2,495	58	410	352	13,86	338	998,11	1,04
A9	6,0	1.259,80	754,7	505,1	2,494	50	370	320	12,60	330	974,49	1,03
A12	6,0	1.251,90	749,0	502,9	2,489	53	410	357	14,06	360	1.063,08	1,03
A13	6,0	1.251,00	748,5	502,5	2,490	52	370	318	12,52	380	1.122,14	1,03
A16	6,0	1.243,70	745,9	497,8	2,498	39	345	306	12,05	355	1.048,32	1,05
B1	6,0	1.247,50	747,6	499,9	2,495	50	410	360	14,17	355	1.048,32	1,04
B3	6,0	1.248,30	749,3	499,0	2,502	62	370	308	12,13	390	1.122,14	1,04
B6	6,0	1.254,20	752,1	502,1	2,498	51	390	339	13,35	370	1.092,61	1,03
B7	6,0	1.245,50	746,7	498,8	2,497	38	390	352	13,86	350	1.033,55	1,04
B10	6,0	1.255,10	753,8	501,3	2,504	41	370	329	12,95	380	1.122,14	1,04
B12	6,0	1.251,80	753,0	498,8	2,510	39	345	306	12,05	410	1.210,73	1,04
B13	6,0	1.257,20	753,8	503,4	2,497	72	415	343	13,50	340	1.004,02	1,03
B15	6,0	1.263,70	757,6	506,1	2,497	41	350	309	12,17	340	1.004,02	1,02
C1	6,0	1.247,90	752,4	495,5	2,518	23	405	382	15,04	390	1.151,67	1,06
C2	6,0	1.248,40	756,0	492,4	2,535	36	390	354	13,94	390	1.151,67	1,08
C5	6,0	1.251,00	743,7	507,3	2,466	49	415	366	14,41	360	1.063,08	1,02
C8	6,0	1.245,90	739,9	506,0	2,462	38	405	367	14,45	370	1.092,61	1,03
C9	6,0	1.262,20	755,6	506,6	2,492	42	370	328	12,91	360	1.033,55	1,02
C11	6,0	1.254,60	753,8	500,8	2,505	51	415	364	14,33	420	1.240,26	1,04
C13	6,0	1.236,50	743,0	493,5	2,506	72	390	318	12,52	380	1.122,14	1,07
C15	6,0	1.243,80	744,9	498,9	2,493	53	415	362	14,25	370	1.092,61	1,04
AP1	6,0	1.255,80	756,2	499,6	2,514	90	415	325	12,80	390	1.151,67	1,04
AP2	6,0	1.247,30	751,1	496,2	2,514	53	380	327	12,87	400	1.181,20	1,06

**ANEXO G – Vazios da Mistura Asfáltica (Vv), Vazios do Agregado Mineral (VAM) e Relação entre Betume e Vazios (RBV) dos Corpos de Prova.**

N. CP	d%	%Vv	%VAM	%RBV
A1	96,07	3,93	18,55	78,84
A4	96,55	3,45	18,16	80,97
A5	96,14	3,86	18,49	79,16
A8	96,31	3,69	18,36	79,88
A9	96,26	3,74	18,40	79,68
A12	96,08	3,92	18,55	78,86
A13	96,08	3,92	18,55	78,89
A16	96,43	3,57	18,26	80,42
B1	96,31	3,69	18,35	79,91
B3	96,55	3,45	18,15	80,99
B6	96,41	3,59	18,27	80,34
B7	96,37	3,63	18,30	80,18
B10	96,63	3,37	18,08	81,37
B12	96,86	3,14	17,89	82,44
B13	96,39	3,61	18,29	80,25
B15	96,37	3,63	18,30	80,17
C1	97,20	2,80	17,60	84,09
C2	97,85	2,15	17,05	87,40
C5	95,18	4,82	19,32	75,02
C8	95,03	4,97	19,44	74,44
C9	96,16	3,84	18,48	79,22
C11	96,69	3,31	18,03	81,64
C13	96,70	3,30	18,02	81,70
C15	96,22	3,78	18,43	79,50
AR1	97,01	2,99	17,76	83,18
AR2	97,02	2,98	17,76	83,20